

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Institut dopravy**

**Posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na  
charakteristiky vznětového motoru**

**Evaluation of Intake Air Parameters Influence to Diesel Engine  
Characteristics**

**Student:  
Vedoucí diplomové práce:**

**Bc. Libor Hrabal  
Ing. Michal Richtář**

**Ostrava 2011**

## **Zadání diplomové práce**

Student: **Bc. Libor Hrabal**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie  
Specializace: 20 Silniční doprava  
Téma: Posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky  
vznětového motoru  
Evaluation of Intake Air Parameters Influence to Diesel Engine  
Characteristics

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky vznětového motoru. Na základě teoretických výpočtů laboratorně ověřit a vyhodnotit teoretické výpočty.

Osnova diplomové práce:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor problému
3. Sestavení metodiky měření a vyhodnocení
4. Experimentální měření
5. Vyhodnocení měření a doporučení
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- MACEK, J., SUK, B. Spalovací motory I. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02085-1.  
MACEK, J., KLIMENT, V. Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03529-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Richtář**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



---

doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě :.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

.....  
Bc. Libor Hrabal

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Libor Hrabal

Adresa trvalého pobytu autora práce: Lidická 191  
798 21 Bedihošť

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HRABAL, L. *Posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky vznětového motoru: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2011, 90 s. Vedoucí práce: Richtář, M.

Diplomová práce se zabývá posouzením vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky vznětového motoru. Cílem práce je pomocí teoretických výpočtů a experimentálního měření na daném vznětovém přeplňovaném motoru posoudit vliv teploty nasávaného vzduchu na výkon a točivý moment motoru, spotřebu paliva, tlak nasávaného vzduchu, teplotu a tlak spalin před turbodmychadlem, množství nasávaného vzduchu a ostatní měřené veličiny. Také je popsána metodika zkoušení na motorové zkušební stanici a metodika vyhodnocení naměřených dat.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

HRABAL, L. *Evaluation of Intake Air Parameters Influence to Diesel Engine Characteristics: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2011, 89 p. Thesis head: Richtář, M.

A master thesis evaluates the intake air parameters influence to diesel engine characteristics. The goal of the thesis is determined by use of theoretical calculations and experimental measurements on the diesel turbocharged engine influence of inlet air temperature on engine performance, fuel consumption, intake air pressure, exhaust gas temperature and pressure before the turbocharger, the amount of intake air and the other measured physical quantity. There are also described creation of a testing procedure in engine testing station and methodology for the evaluation of measured results.

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| Seznam použitých značek a symbolů .....  | 9  |
| 1 Úvod.....  | 13 |
| 2 Teoretický rozbor problému .....   | 16 |
| 2.1 Základní pojmy .....   | 16 |
| 2.2 Teoretický rozbor činnosti vznětového přeplňovaného motoru .....                 | 17 |
| 2.3 Ideální pracovní oběh vznětového přeplňovaného motoru .....                      | 18 |
| 2.4 Skutečný oběh vznětového přeplňovaného motoru .....                              | 23 |
| 2.5 Možnosti ovlivnění středního efektivního tlaku .....                             | 24 |
| 2.6 Teoretické výpočty .....   | 27 |
| 2.6.1 Vliv teploty nasávaného vzduchu na tepelnou účinnost.....                      | 28 |
| 2.6.2 Vliv teploty nasávaného vzduchu na výkon .....                                 | 32 |
| 2.6.3 Vliv teploty nasávaného vzduchu na plnicí a dopravní (objemovou) účinnost..... | 34 |
| 3 Sestavení metodiky měření a vyhodnocení .....                                      | 40 |
| 3.1 Technická zařízení .....   | 40 |
| 3.1.1 Dynamometr .....   | 41 |
| 3.1.2 Paletový systém a spojovací hřídel .....                                       | 42 |
| 3.1.3 Ovládání pedálu plynu .....  | 43 |
| 3.1.4 Palivový systém .....  | 43 |
| 3.1.5 Chladicí systém motoru .....   | 44 |
| 3.1.6 Chladicí zařízení nasávaného vzduchu do motoru .....                           | 45 |
| 3.1.7 Měření teplot a tlaků .....  | 45 |
| 3.1.8 Měření teploty a vlhkosti okolí.....   | 47 |
| 3.2 Sběr dat .....   | 48 |
| 3.2.1 Data z VCDS .....  | 48 |
| 3.2.2 Data z ovládacího programu .....   | 49 |
| 3.3 Metodika měření .....  | 51 |
| 3.4 Metodika vyhodnocení .....   | 54 |
| 4 Experimentální měření.....   | 59 |
| 4.1 Motor použitý k měření .....   | 59 |
| 4.2 Vnější rychlostní charakteristika .....  | 60 |
| 4.3 Zkušební měření .....  | 62 |
| 5 Vyhodnocení měření a doporučení .....  | 66 |
| 5.1 Vyhodnocení naměřených hodnot točivého momentu motoru.....                       | 66 |
| 5.2 Vyhodnocení ostatních hodnot .....   | 68 |

|   |    |
|---|----|
| 5.3 Závislost teploty plnicího vzduchu na hodinové spotřebě a měrné spotřebě paliva..     | 70 |
| 5.4 Závislost teploty plnicího vzduchu na točivém momentu a výkonu .....                  | 73 |
| 5.5 Závislost teploty plnicího vzduchu na plnicím tlaku .....                             | 76 |
| 5.6 Vliv teploty plnicího vzduchu na výfukové plyny.....                                  | 79 |
| 5.7 Působení teploty plnicího vzduchu na střední efektivní tlak a efektivní účinnost..... | 81 |
| 5.8 Zjednodušený návrh mezichladiče plnicího vzduchu .....                                | 82 |
| 6 Závěr .....   | 87 |
| 7 Seznam použité literatury .....   | 89 |
| 8 Seznam příloh .....   | 90 |



## Seznam použitých značek a symbolů

|                   |  |
|-------------------|--|
| A                 | - celková práce oběhu [J]  |
| A <sub>1</sub>    | - práce vysokotlakého oběhu [J]  |
| A <sub>2</sub>    | - práce výměny obsahu válců [J]  |
| bar               | - jednotka tlaku 1 bar = 0,1 MPa   |
| CAN               | - Controller Area Network, komunikační sběrnice  |
| CO                | - oxid uhelnatý  |
| CO <sub>2</sub>   | - oxid uhličitý  |
| DOHC              | - Double OverHead Cam, dvě vačkové hřídele v hlavě válců                                 |
| DPF               | - Diesel Particulate Filter, filtr pevných částic výfukových plynů                       |
| c <sub>p</sub>    | - měrná tepelná kapacita plynu za stálého tlaku [kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]  |
| c <sub>v</sub>    | - měrná tepelná kapacita plynu za stálého objemu [kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
| EDC               | - Electronic Diesel Control EDC, elektronická regulace vznětového motoru                 |
| EGR               | - Exhaust gas recirculation, recirkulace spalin  |
| EOBD              | - European On-Board Diagnostics, jednotná evropská palubní diagnostika                   |
| EURO              | - emisní norma   |
| HC                | - uhlovodíky   |
| H <sub>u</sub>    | - dolní výhřevnost paliva [J.kg <sup>-1</sup> ]  |
| i                 | - počet válců  |
| KH                | - kliková hřídel   |
| k                 | - konstanta pracovního oběhu motoru  |
| M                 | - měřicí rozsah  |
| MAF               | - Mass Air Flow meter, měřič množství nasávaného vzduchu                                 |
| MPV               | - Multi-Purpose Vehicle, víceúčelová vozidla často s více jak pěti místy k sezení        |
| M <sub>e</sub>    | - točivý moment motoru [N.m]   |
| M <sub>p</sub>    | - hodinová spotřeba paliva [kg.h <sup>-1</sup> ]   |
| M <sub>chvz</sub> | - množství chladícího vzduchu protékající mezichladičem [kg.h <sup>-1</sup> ]            |
| m <sub>e</sub>    | - množství vzduchu, které se skutečně dostane do válců motoru [kg.s <sup>-1</sup> ]      |
| m <sub>pe</sub>   | - měrná spotřeba paliva [kg.kW <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> ]                          |
| m <sub>pcy</sub>  | - hmotnostní tok paliva na jeden cyklus [kg.cyklus <sup>-1</sup> ]                       |
| m <sub>s</sub>    | - množství vzduchu procházející sacím systémem motoru [kg.s <sup>-1</sup> ]              |
| m <sub>vz</sub>   | - průtok sacím systémem motoru [kg.s <sup>-1</sup> ]                                     |
| m <sub>z</sub>    | - hmotnostní průtok čerstvého vzduchu odpovídající objemu válce [kg.s <sup>-1</sup> ]    |
| m <sub>zv</sub>   | - spotřeba paliva na zdvih [mg.zdvih <sup>-1</sup> ]                                     |

|            |  |
|------------|--|
| $N_{pol}$  | - poloha ovladače VNT mechanismu [%]   |
| $NO_x$     | - oxidy dusíku   |
| $n$        | - koeficient polytropy   |
| $n_m$      | - otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]  |
| $P_e$      | - efektivní výkon motoru [W]   |
| $P_i$      | - indikovaný výkon motoru [W]  |
| $p_{is}$   | - střední indikovaný tlak [Pa]   |
| $p_a, p_b$ | - atmosférický tlak [Pa]   |
| $p_{atm}$  | - atmosférický tlak [Pa]   |
| $p_e$      | - střední efektivní tlak [Pa]  |
| $p_{hi}$   | - relativní vlhkost vzduchu [%]  |
| $p_{max}$  | - maximální tlak ve spalovacím prostoru válce [Pa]                           |
| $p_{ovl}$  | - podtlak v ovladači VNT mechanismu [Pa]                                     |
| $p_s$      | - plnicí tlak [Pa]   |
| $p_v$      | - tlak výfukových plynů [Pa]   |
| $p_{1k}$   | - relativní tlak vzduchu před dmychadlem (kompresorem) [Pa]                  |
| $p_{2k}$   | - relativní tlak plnicího vzduchu za dmychadlem (kompresorem) [Pa]           |
| $p_{1m}$   | - relativní tlak plnicího vzduchu za mezichladičem [Pa]                      |
| $p_{1mA}$  | - absolutní tlak plnicího vzduchu za mezichladičem [Pa]                      |
| $p_{1t}$   | - relativní tlak výfukových plynů před turbínou [Pa]                         |
| $p_{2t}$   | - relativní tlak výfukových plynů za turbínou [Pa]                           |
| $Q_{MCH}$  | - teplo odvedené mezichladičem [W]   |
| $Q_o$      | - odvod tepla [J]  |
| $Q_p$      | - přívod tepla za konstantního tlaku [J]                                     |
| $Q_v$      | - přívod tepla za konstantního objemu [J]                                    |
| $q$        | - měrné teplo [ $\text{J.kg}^{-1}$ ]   |
| REA        | - Rotary Electronic Actuator, elektronický ovladač lopatek VNT mechanismu    |
| ŘJ         | - řídicí jednotka  |
| $r$        | - měrná plynová konstanta [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]               |
| SCR        | - Selective catalytic reduction, katalytická redukce $NO_x$                  |
| SUV        | - Sport Utility Vehicle, sportovní užitková vozidla určená do lehkého terénu |
| SW         | - Software, programové vybavení  |
| $S_{\xi}$  | - čelní plocha mezichladiče [ $\text{m}^2$ ]                                 |
| $s$        | - měrná entropie [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]                        |
| $T$        | - teplota [K]  |

|              |  |
|--------------|--|
| TDI          | - Turbocharged Direct Injection, obchodní název turbodmychadlem přeplňovaných vznětových motorů s přímým vstřikováním paliva koncernu Volkswagen |
| TP           | - třída přesnosti  |
| $t_o$        | - teplota okolí [ $^{\circ}\text{C}$ ]   |
| $t_{1k}$     | - teplota vzduchu před dmychadlem (kompresorem) [ $^{\circ}\text{C}$ ]   |
| $t_{2k}$     | - teplota plnicího vzduchu za dmychadlem (kompresorem) [ $^{\circ}\text{C}$ ]  |
| $t_{1m}$     | - teplota plnicího vzduchu za mezichladičem [ $^{\circ}\text{C}$ ]   |
| $t_{1t}$     | - teplota výfukových plynů před turbínou [ $^{\circ}\text{C}$ ]  |
| $t_{2t}$     | - teplota výfukových plynů za turbínou [ $^{\circ}\text{C}$ ]  |
| $u_A$        | - standardní nejistota typu A  |
| $u_B$        | - standardní nejistota typu B  |
| $u_C$        | - kombinovaná standardní nejistota typu C  |
| U            | - rozšířená nejistota měření   |
| VCDS         | - VAG-COM diagnostický program Volkswagen group  |
| VNT          | - Variable Nozzle Turbine, proměnná regulace turbodmyhadla   |
| $V_c$        | - kompresní objem [ $\text{m}^3$ ]   |
| $V_k$        | - kompresní objem válce [ $\text{m}^3$ ]   |
| $V_z$        | - zdvihový objem válce [ $\text{m}^3$ ]  |
| $V_{mz}$     | - hmotnostní proud vzduchu [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]   |
| $V_{vz}$     | - objemový proud vzduchu [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ]  |
| $V_{zb}$     | - objem zbylých spalín [ $\text{m}^3$ ]  |
| WG           | - WasteGate, regulace turbodmyhadla obtokem  |
| $v_{vzch}$   | - rychlost vzduchu protékajícího chladičem [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  |
| $\alpha$     | - poloha pedálu plynu resp. zatížení motoru [%]  |
| $\epsilon_C$ | - celkový kompresní poměr [1]  |
| $\epsilon_D$ | - kompresní poměr dmyhadla [1]   |
| $\epsilon_M$ | - kompresní poměr motoru [1]   |
| $\eta_{ch}$  | - chemická účinnost [1]  |
| $\eta_d$     | - dopravní účinnost [1]  |
| $\eta_e$     | - efektivní účinnost [1]   |
| $\eta_i$     | - indikovaná účinnost [1]  |
| $\eta_m$     | - mechanická účinnost [1]  |
| $\eta_{pl}$  | - plnicí účinnost [1]  |
| $\eta_t$     | - tepelná účinnost [1]   |

|                |  |
|----------------|--|
| $\varphi_{pr}$ | - součinitel proplachu [1]   |
| $\kappa$       | - adiabatický exponent   |
| $\lambda$      | - vzdušný součinitel [1]   |
| $\rho_a$       | - hustota vzduchu za atmosférického tlaku [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]   |
| $\rho_{pl}$    | - hustota plnicího vzduchu [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]                  |
| $\rho_{1m}$    | - hustota plnicího vzduchu za mezichladičem [ $\text{kg.m}^{-3}$ ] |
| $\sigma_t$     | - teoretické množství vzduchu [ $\text{kg.kg}^{-1}$ ]              |
| $\omega_{CH}$  | - stupeň chlazení plnicího vzduchu [1]                             |

..

## 1 Úvod

Vznětový motor je výbušný motor, který pro vznícení paliva (motorové nafty) vstříknutého do válce případně do komůrky ke konci kompresního zdvihu využívá kompresní teplo vzniklé při stlačení nasátého vzduchu. Palivovou směs tvoří motorová nafta a vzduch. Vznětový motor tedy pracuje s tzv. Dieselovým oběhem.

Termodynamický dieselový oběh a stejně tak vznětový respektive dieselový motor objevil v roce 1897 německý vynálezce Rudolf Diesel, po kterém se tak nazývá. Dieselový motor byl tedy objeven později než zážehový. Oběh dieselového motoru může být jak dvoutaktní, tak čtyřtaktní. V prvopočátcích byl motor používán u lodních motorů nebo u starších lokomotiv nezávislé trakce. Od roku 1930 [1] se začal používat v silničních vozidlech a to zejména v nákladních a užitkových. V současné době najdeme ve vozidlech kategorie N2, N3 a M2, M3 výhradně vznětové motory ve většině případech s výfukovým turbodmychadlem. Ve vozidlech kategorie N1 a M1 se vznětový motor začal více vyskytovat až po roce 1970 [1]. Z počátku byl totiž odmítán pro jeho hlučnost a slabou dynamiku vozidel vybavených tímto motorem. Také cena ropy byla v té době nižší než nyní, a proto nebyl důvod tyto vozy kupovat pro jejich nesporně nižší spotřebu paliva. Ta je dána zejména termodynamickou účinností, která je u vznětového motoru větší než u zážehového.

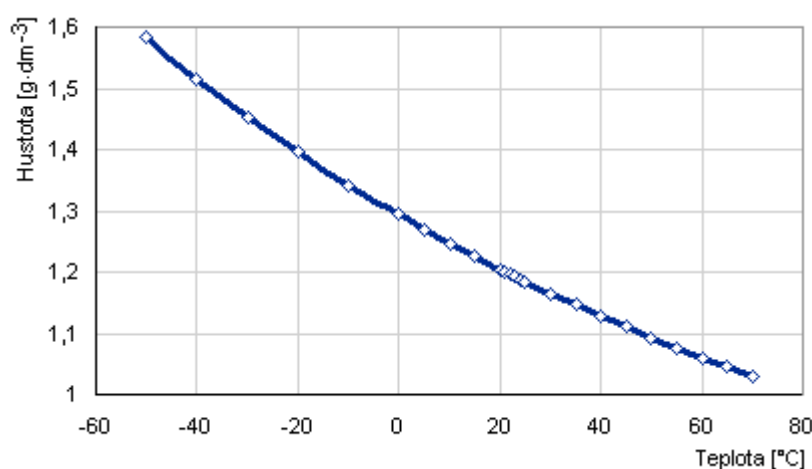
Turbodmychadlo vynalezl švýcarský inženýr Alfred Büchi a nechal si jej patentovat v roce 1905. Od roku 1920 pro pohon nákladních lodí a lokomotiv byly používány vznětové přeplňované motory. První silniční vozidlo s turbodmychadlem přeplňovaným motorem vyrobila firma *"Schweizer Maschinenfabrik Saurer"*. Jednalo se o nákladní automobil se vznětovým motorem a psal se rok 1938. Pak zbrzdila vývoj druhá světová válka a první turbodmychadlem přeplňovaný osobní automobil vyrobil až v roce 1962 General Motors. Prvenství v aplikaci pro osobní automobil poháněný vznětovým přeplňovaným motorem patří *Mercedesu 300 SD turbodiesel* a *Peugeotu 604 turbodiesel* v roce 1978. Oba vozy byly vybaveny turbodmychadly firmy Garrett. [1]

Vývoj motorů pokračoval a přešel od komůrkových motorů k technologii přímého vstřikování paliva do válce, která se používá dodnes. Nejznámější je systém Common Rail (vysokotlaký zásobník paliva) od různých výrobců.

Moderní přeplňovaný motor charakterizují tato základní konstrukční řešení:

- \* zásobování palivem zajišťuje systém CR s vysokotlakým čerpadlem od různých výrobců např. Bosch, Continental, Denso apod. Palivo je do válců rozprašováno přes elektromagnetické nebo přes piezo-vstřikovače. Vstřikovaná dávka je rozfázována až do sedmi fází na hlavní, před a následné vstřiky.
- \* nízký kompresní poměr pohybující se kolem 16,5:1. V blízké budoucnosti představí Toyota motor z kompresním poměrem 14:1.
- \* přeplňování výfukovým turbodmychadlem vybaveným technologiemi WG nebo VNT pro regulaci plnicího tlaku. Ovládání je řešeno pneumatickým ovladačem (podtlakový nebo přetlakový) případně elektronickým (REA). Teplota výfukových plynů kvůli získání vysoké energie dosahuje až 860 °C. Plnicí tlak dosahuje až 2,6 bar absolutně. Tlak na výstupu z motoru až 2,8 bar.
- \* chlazení plnicího vzduchu mezichladičem resp. tepelným výměníkem vzduch-vzduch nebo voda-vzduch. Teplota vzduchu vlivem vysokého plnicího tlaku dosahuje na výstupu z kompresoru turbodmychadla až 200 °C. Proto je nutné nasávaný vzduch chladit a udržovat v určitém rozmezí během provozu vozidla. Hustota plnicího vzduchu resp. teplota se projevuje na výkonu motoru, spotřebě paliva a tím pádem i objemu emisí.
- \* škrticí klapka. Ta se využívá pro uklidnění doběhu motoru při jeho vypnutí. Klapka se přivře a tím dojde ke kompresi menšího množství vzduchu a motor doběhne měkčeji. Dále se klapka používá při recirkulaci spalin a regeneraci filtru pevných částic pro škrcení nasávaného vzduchu.
- \* EGR systém pro zpětnou recirkulaci spalin pro snížení emisí  $\text{NO}_x$ .
- \* oxidační katalyzátor v jednom obalu s filtrem pevných částic umístěný ihned za turbodmychadlem kvůli udržení vysokých teplot. Oxidační katalyzátor slouží k přeměně plynů nedokonalého spalování CO a HC na  $\text{CO}_2$  a vodní páru. Filtr pevných částic absorbuje saze a při určitém zanesení dojde k jeho vyprázdnění vypálením.
- \* SCR technologií pro likvidaci  $\text{NO}_x$ . SCR katalyzátor je umístěn až za oxidačním katalyzátorem. Pomocí vstřikování aditiva na bázi močoviny do SCR katalyzátoru dochází k přeměně  $\text{NO}_x$  na dusík a vodní páru. Některá vozidla musí pro splnění EURO 5 být touto technologií vybavena již dnes. S platností EURO 6 bude většina vozidel vybavena SCR.

Jakkoli jsou dnes vyráběné motory vybaveny nejmodernějšími technologiemi pořád pro ně platí stejné principy jako na počátku. Hlavním cílem této diplomové práce je určit za pomoci teoretických vztahů a následného experimentálního měření vliv teploty nasávaného resp. plnicího vzduchu na vybrané parametry moderního vznětového turbodmychadlem přeplňovaného motoru. Mezi tyto parametry patří efektivní výkon motoru, točivý moment motoru, spotřeba paliva, střední efektivní tlak, efektivní účinnost a mnohé další, které vyplynou z následujícího textu. Teplota plnicího vzduchu výrazně ovlivňuje nejdůležitější fyzikální vlastnost vzduchu ve vztahu k práci spalovacího motoru a to hustotu vzduchu. Změna hustoty vzduchu vlivem teploty je zobrazena na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Závislost hustoty vzduchu na jeho teplotě [2]

Cílem práce také je navrhnout metodiku měření tak, aby byla za určitých vstupních podmínek zajištěna opakovatelnost měření, navrhnout metodiku vyhodnocení naměřených dat, dále zhodnotit rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami, stanovit použitelnost těchto vztahů a vyvodit závěry a důsledky.

Přínos práce spočívá zejména v netradičním pohledu na problematiku turbodmychadlem přeplňovaných zejména vznětových motorů (použité vztahy lze aplikovat i na zážehové), kdy se bezprostředně porovnává teorie s praxí. V neposlední řadě je práce přínosem pro autora, který si prohloubil znalosti v oblasti spalovacích motorů.

## 2 Teoretický rozbor problému

V kapitole je stručně vysvětlen princip práce vznětového turbodmychadlem přeplňovaného motoru. Vysvětlení základních pojmů a charakteristických veličin. Zejména těch, které jsou nějakým způsobem ovlivňovány teplotou plnicího vzduchu. Tento vliv je demonstrován na teoretických výpočtech. Výpočty, které také souvisí s teorií, ale navazují na naměřená data, jsou uvedeny v kapitole 5.

### 2.1 Základní pojmy

Spalovací motor je tepelný stroj a jako takový koná práci. Ta se vypočítá křivkovým integrálem [3]. Respektive práci představuje plocha pod křivkou na obr. 2.1.

$$A = \oint p \cdot dV \quad (2.1)$$

kde:

$p$  - tlak ve válci

$V$  - objem válce

Ve zjednodušeném tvaru lze spočítat jako:

$$A = p_{is} \cdot V \quad (2.2)$$

$p_{is}$  - střední indikovaný tlak

**Střední indikovaný tlak  $p_{is}$  (Pa)**- je to porovnávací parametr motoru. Je to hodnota tlaku, která při přesunutí píst z horní úvratě do dolní vykoná stejnou práci, jaká vznikne za jeden pracovní cyklus válce.

**Střední efektivní tlak motoru  $p_e$  (Pa)** – opět se jedná o porovnávací parametr motoru, který přímo souvisí s velikostí točivého momentu motoru.

**Indikovaný výkon motoru  $P_i$  (kW)** – je to výkon získaný z tepelného oběhu motoru na pístech.

**Efektivní výkon motoru  $P_e$  (kW)** – skutečný výkon odebraný z klikové hřídele motoru. Je menší než indikovaný výkon motoru, protože zohledňuje mechanické ztráty motoru.



**Chemická účinnost**  $\eta_{ch}$  – účinnost přeměny chemické energie vázané v chemických vazbách paliva na teplo během spalování. Lze ji ovlivnit promícháním paliva se vzduchem a přebytkem množství vzduchu ve směsi.

**Tepelná účinnost**  $\eta_t$  – vyjadřuje jaký podíl uvolněného tepla při spalování je přeměněn v práci získanou na pístech motoru. Největší vliv na ni má stupeň komprese u přeplňovaných motorů pak celková dynamická komprese, která se spočítá podle vztahu (6) dále rychlost spalování a tepelné ztráty motoru.

**Indikovaná účinnost**  $\eta_i$  – součin chemické a tepelné účinnosti. Používá se z důvodu experimentálního měření, neboť nelze odděleně změřit chemickou a tepelnou účinnost skutečného motoru.

**Mechanická účinnost**  $\eta_m$  – vyjadřuje účinnost přenosu práce z pístu na klikovou hřídel. Zohledňuje třecí ztráty motoru, ventilační ztráty, pohony příslušenství motoru (rozvodový mechanismus, čerpadla apod.). Je ovlivnitelná konstrukcí mechanické části motoru (ložiska, písty, provedení vačkových hřídelí apod.). Také na ni má vliv viskozita použitého oleje.

**Efektivní účinnost**  $\eta_e$  – součin indikované a mechanické účinnosti. Celková účinnost motoru, která vyjadřuje kvalitu přeměny energie vázané v palivu na práci na klikovém hřídeli.

**Dopravní (objemová) účinnost**  $\eta_d$  – někdy také označována jako plnicí účinnost. Popisuje účinnost naplnění válce vzduchovou náplní.

## 2.2 Teoretický rozbor činnosti vznětového přeplňovaného motoru

Jednotlivé pracovní takty (sání, stlačování, výbuch, výfuk) pravidelně se opakující vytvářejí otevřený oběh s uzavřenou částí, která se uskutečňuje v pracovním válci. Na část oběhu probíhající mimo pracovní válec (sání) má velký vliv přeplňování. Spalování hořlavé směsi probíhá přímo v pracovním prostoru v uzavřené části oběhu. Pracovní prostor tvoří část objemu válce. Probíhající děje:

1. Plnění pracovního prostoru vzduchem. Hlavní odlišnost proti atmosférickému motoru. Vzduch se do válce nedostává podtlakem, který vytváří píst při sacím zdvihu, ale přetlakem vytvořeným dmychadlem. Je tedy vhodné hovořit o plnění válce vzduchem nežli o sání. Výsledkem přeplňování je mnohem vyšší plnicí účinnost  $\eta_{pl}$ .
2. Stlačování nasátého vzduchu pístem. Dochází ke zvýšení teploty i tlaku.
3. Tvorba hořlavé směsi. U vznětového motoru probíhá vnitřní tvorba směsi vstřikem paliva (motorové nafty) až do vzduchu v pracovním prostoru válce.
4. Vznícení směsi vlivem vysoké teploty od náplně. Část směsi se vznítí a část hoří od vzniklého plamene.
5. Spalování směsi se vzrůstající teplotou. Dochází nejprve k nárůstu tlaku pak přes přívod tepla od hořící směsi klesá v důsledku pohybu pístu dolů.
6. Expanze spalin. Za poklesu tlaku a teplot koná píst práci.
7. Výfuk. Nejprve vlivem rozdílů tlaků ve výfukovém kanálu a prostorů válce, který je ihned po otevření výfukového ventilu větší. Zbytek spalin je vytlačen pístem při pohybu do horní úvrati. [4]

V bodech 1, 7 a i v bodě 3 je oběh otevřený. Dochází při něm totiž k dodávce paliva, což lze chápat jako přívod hmotnosti zvenčí. Lze to ale zanedbat, protože objem paliva vůči celkovému objemu je nepatrný. Děje 2, 4 a 6 považujeme za děje uzavřené a při určité chybě k nim lze zařadit i děj 3. Ve skutečnosti jsou všechny pracovní body otevřené. Pracovní prostor válce není totiž zcela těsný. Jedná se, ale o minimální úniky, a proto při dané přesnosti lze body 2, 4 a 6 považovat za uzavřené. (viz obr 2.1).

Děje 1 a 7 se nazývají výměnou náplně válce. Body, které z určitou přesností považujeme za uzavřené nazýváme vysokotlakou částí oběhu. [4]

### 2.3 Ideální pracovní oběh vznětového přeplňovaného motoru

Ideální neboli srovnávací teoretické oběhy se používají pro přehledné výpočty s určitými zjednodušujícími předpoklady. Velice jednoduše se u těchto oběhů vyhodnocují tlaky, teploty, tepelná účinnost a střední efektivní tlak.

Mluvíme-li o ideálním oběhu máme na mysli zjednodušení zahrnující:

- \* uzavřenou soustavu s konstantním složením pracovní látky. Ta je nahrazena vzduchem.
- \* všechny změny probíhající v oběhu jsou vratné

- \* platnost stavové rovnice plynu v měrném stavu dle [3]

$$\blacksquare p \cdot v = r \cdot T \quad (2.3)$$

kde:

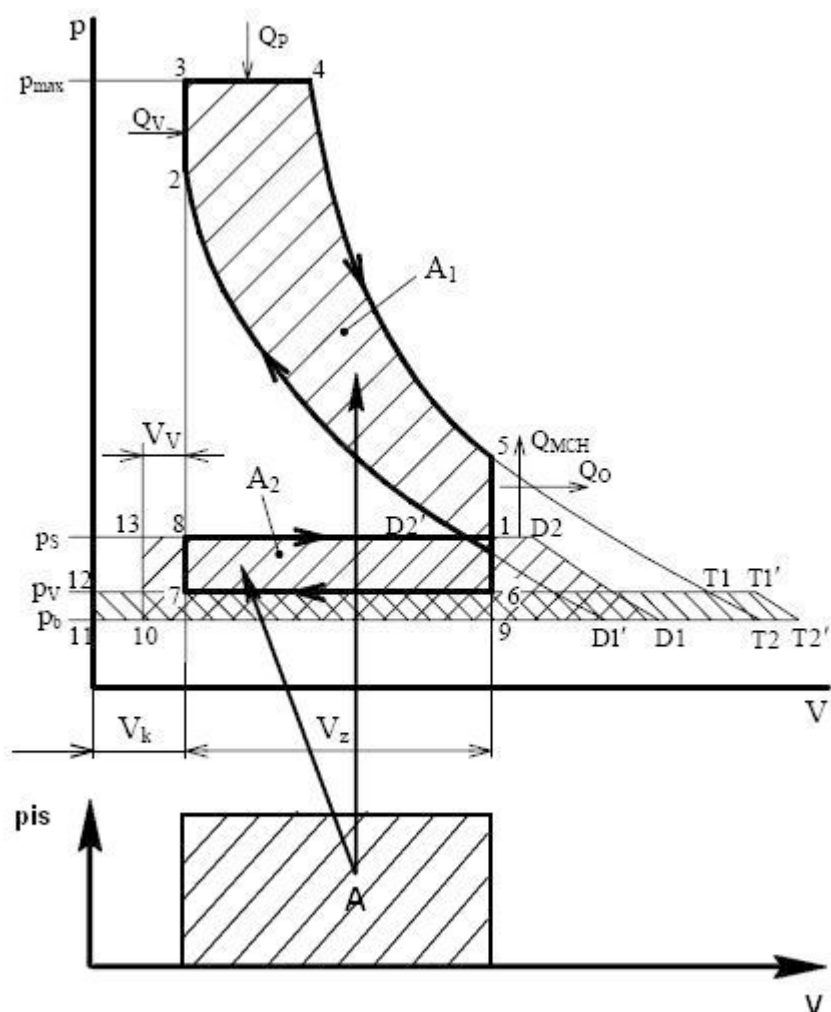
$p$  – tlak plynu [Pa]

$v$  – měrný objem plynu [ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

$r$  - měrná plynová konstanta [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$T$  – teplota plynu [K]

- \* přívod tepla hořením se skládá z přívodu jedné části tepla za konstantního objemu (izochorická změna) a druhé části tepla za konstantního tlaku (izobarická změna)
- \* pracovní prostor válce považujeme za zcela teplotěsný. Z pracovního prostoru válce nedochází k žádnému úniku tepla. Mluvíme o tzv. adiabatickém motoru (adiabatická změna je bez úniku tepla).
- \* výměna náplně válce se nahrazuje odvodem tepla při izochorické změně



Obr. 2.1 Zidealizovaný pracovní oběh vznětového přeplňovaného motoru, p-V diagram [3]

Ideální pracovní oběh vznětového přeplňovaného motoru turbodmychadlem zobrazený na obr. 2.1. představuje stav, kdy plnicí tlak je větší než tlak před turbínou. To je nejčastější provozní stav. Oběh mezi body 1-2-3-4-5-6-7-8-1 platí při pohonu dmyhadla z cizího zdroje a ne od tlaku plynů. To znamená, že obě plochy jak  $A_1$  tak  $A_2$  představují kladnou práci. Popis jednotlivých veličin a pracovních bodů oběhu:

- \*  $p_{\max}$  – maximální tlak až 20 MPa [3]
- \*  $p_s$  – plnicí tlak
- \*  $p_{is}$  – střední efektivní tlak
- \*  $p_v$  – tlak výfukových plynů před vstupem do turbínové skříně
- \*  $p_b$  – atmosférický tlak
- \*  $V_k$  – kompresní objem válce
- \*  $V_z$  – zdvihový objem válce
- \*  $A_1$  – plocha, která vyjadřuje práci vysokotlaké části oběhu
- \*  $A_2$  – plocha, která vyjadřuje práci výměny obsahu válců
- \*  $A$  – plocha, která vyjadřuje celkovou práci z oběhu při středním efektivním tlaku
- \*  $Q_{MCH}$  – odvod tepla mezichladičem nasávaného vzduchu
- \* 1 - 2 adiabatická komprese nasávaného vzduchu
- \* 2 - 3 izochorický přívod tepla  $Q_v$  (přívod tepla od hoření za konstantního objemu)
- \* 3 - 4 izobarický přívod tepla  $Q_p$  (přívod tepla od hoření směsi za konstantního tlaku)
- \* 4 - 5 adiabatická expanze
- \* 5 - 1 izochorický odvod tepla  $Q_o$  (odvod tepla výfukem)
- \* 5 - T1 – 6 - 5 představuje přeměnu expanzní práce v kinetickou energii a jejím utlumením ve vnitřní energii při vzrůstu teploty za konstantního tlaku
- \* 12 - T1 - T2 – 11 – 12 práce turbíny při impulsním provozu. Při impulsním provozu se pro energii turbíny využívá tlakových a teplotních pulsů, které vznikají pravidelným výtokem výfukových plynů z jednotlivých válců motoru. Aby bylo možné pulsy využít, je potřeba dodržet určité konstrukční prvky. Mezi ty nejdůležitější patří malý průměr a krátká délka potrubí až k turbíně, oddělené přívody výfuků s pořadím vznětu alespoň 240 ° KH [3], maximálně spojit 3 přívody do jedné větve ústící k turbíně. Zejména na výfukových svodech pro osobní automobily lze najít rozdělení kanálů.
- \* 12 - T1' - T2' – 11 - 12 práce turbíny při rovnotlakém provozu. Pro rovnotlaké přeplňování jsou charakteristické velké objemy výfukových potrubí. Výfukové

potrubí není děleno do samostatných kanálů tak jako u impulsního přeplňování, ale spojeno v jeden společný s cílem rozrušit tlakové vlny. Jako zdroj energie se tedy využívá hlavně potencionální a tepelná energie výfukových plynů. Používá se obecně u všech aplikací, kde nejsou časté změny provozních režimů (lodní motory, stabilní motory pro pohon agregátů apod.).

- \* 13 - D2 - D1 – 10 - 13 práce dmyhadla(kompresoru) při provozu s mezichladičem nasávaného vzduchu
- \* D2 - D2' odvod tepla z mezichladiče
- \* 13 – D2' - D1' – 13 – 13 práce dmyhadla bez mezichladiče [3]

Z uvedeného oběhu lze získat následující vztahy

Kompresní poměry motoru, dmyhadla a celkový. Vztahy jsou vztažené k obr. 2.1 dle [3]

$$\varepsilon_M = \frac{V_5}{V_2} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_D = \frac{V_{D1'}}{V_5} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_C = \varepsilon_M \cdot \varepsilon_D \cdot \frac{V_{D1'}}{V_2} \quad (2.6)$$

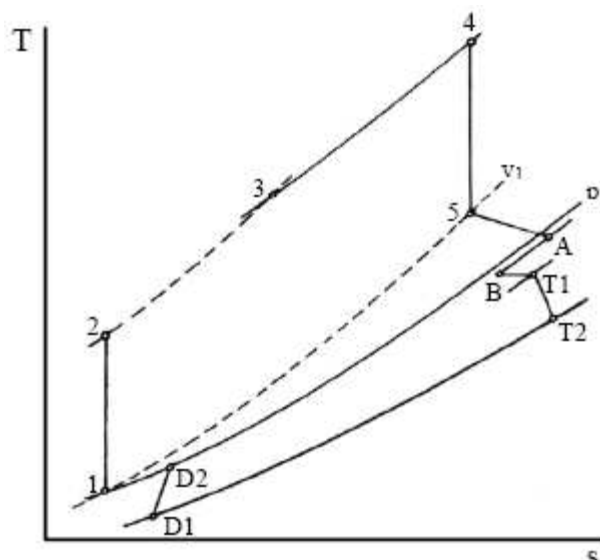
Stupeň ochlazení plnicího vzduchu dle [3]

$$\omega_{CH} = \frac{V_1}{V_{D2}} \quad (2.7)$$

Celková práce motoru při vynechání práce turbíny a dmyhadla dle [3]

$$A=A_{i1}+A_{i2}, \text{ kde } A_{i2} = (p_{2C} - p_{1T}) \cdot (V_1 - V_2) \quad (2.8)$$

Nejlépe patrná je činnost turbodmyhadla při znázornění v T-s diagramu. Ideální oběh zobrazení v T-s diagramu je na obr.2.2.



Obr. 2.2 T-s diagram ideálního oběhu vznětového turbodmychadlem přeplňovaného motoru s mezichladičem nasávaného vzduchu. [3]

Popis diagramu k obr. 2.2

- \* D1 – D2 stlačování vzduchu dmychadlem s nárůstem teploty i měrné entropie
- \* D2 – 1 pokles teploty nasávaného vzduchu resp. odvod tepla přes mezichladič nasávaného vzduchu
- \* 1 - 2 adiabatická komprese nasátého vzduchu ve válci motoru
- \* 2 - 3 izochorický přívod tepla  $Q_V$  (přívod tepla od hoření za konstantního objemu)
- \* 3 - 4 izobarický přívod tepla  $Q_P$  (přívod tepla od hoření směsi za konstantního tlaku)
- \* 4 - 5 adiabatická expanze
- \* 5 – A Výtok výfukových plynů z válce motoru. Pokles teploty, resp. odvod tepla.
- \* A – B Do válce motoru se začíná dostávat čerstvý vzduch, který vytlačuje výfukové plyny a dochází tak k jejich míšení.
- \* B – T1 isothermická změna stavu ve výfukovém potrubí mezi válcem a turbínou
- \* T1-T2 skutečná expanze v turbíně
- \* čárkovaně jsou vyznačeny čáry konstantních objemů, plné jsou čáry konstantních tlaků

Plocha křivky představuje množství sděleného tepla z oběhu. Získá se vztahem dle [3]

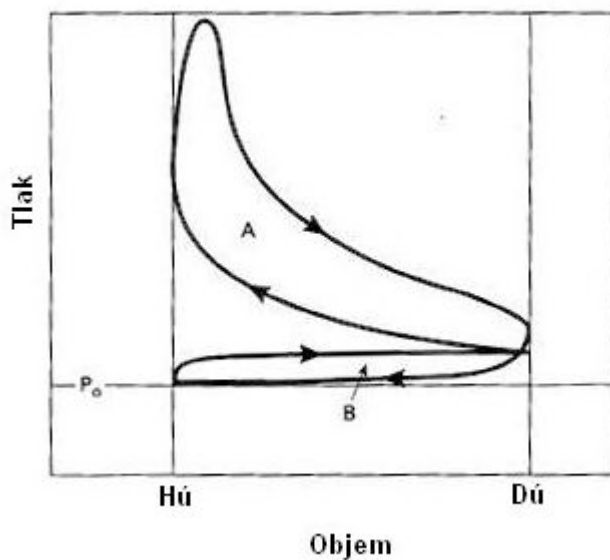
$$q = \oint T \cdot ds \quad (2.9)$$

## 2.4 Skutečný oběh vznětového přeplňovaného motoru

Hlavními důvody proč se skutečné oběhy liší od ideálních jsou

- \* nedochází k výměně ideálního plynu, ale skutečného. Přesněji k výměně pracovní náplně. U vznětového motoru se jedna o vzduch a ke konci komprese vstříknuté palivo. Přechody nejsou ostře ohraničené, ale jsou pozvolné. Je to dáno pozvolným spalováním směsi v důsledku omezené rychlosti hoření. Výsledkem pak je menší plocha oběhu a tím pádem méně odevzdané práce.
- \* Komprese i expanze nejsou ve skutečnosti adiabatické, ale polytropické. Polytropický exponent není konstantní, ale mění se. Zejména vlivem přestupu tepla přes stěny válce a spalovacího prostoru, změnou měrných tepel náplně v závislosti na její teplotě, vlivem chemických změn při spalování a od netěsnosti pístové skupiny a dalších.
- \* V závislosti na otáčkách motoru se mění doba cyklu. To má největší vliv na plnění a spalování. Zkrácením těchto dob dochází ke zhoršení plnění a spalování. Prodloužení má za následek větší tepelné ztráty, netěsnosti apod.

Skutečný oběh zobrazuje indikátorový diagram, kdy je snímán tlak ve válci piezosnímačem a aktuální objem se následně přepočítá ze zdvihu pístu.



Obr. 2.3 Indikátorový diagram vznětového turbodmychadlem přeplňovaného motoru [5]

## 2.5 Možnosti ovlivnění středního efektivního tlaku

Ze vztahu (2.2), který definuje odevzdanou práci spalovacím motorem, je zřejmé, že pro zvýšení získané práce je nutné navýšit obě veličiny. Objem motoru je konstantní, protože motor pro následné měření je určen. Lze tedy změnit jen střední efektivní tlak. Nejefektivnější cesta jak ho zvýšit je vybavit motor přeplňováním. Zkušební motor pro měření je již přeplňováním a to výfukovým turbodmychadlem vybaven. Omezím se tedy na numerické a následně empirické zjištění vlivu teploty plnicího vzduchu zejména na střední efektivní tlak, ale i ostatní veličiny.

Střední efektivní tlak vypočítáme podle vztahu dle [3] a lze jej použít pro zhodnocení účinku teploty plnicího vzduchu. Zanedbáme-li ve vztahu mechanické ztráty (mechanickou účinnost), získáme střední indikovaný tlak namísto efektivního.

$$p_e = \frac{H_u}{\sigma_t \cdot \lambda} \cdot \rho_{pl} \cdot \eta_{pl} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \quad (2.10)$$

kde:

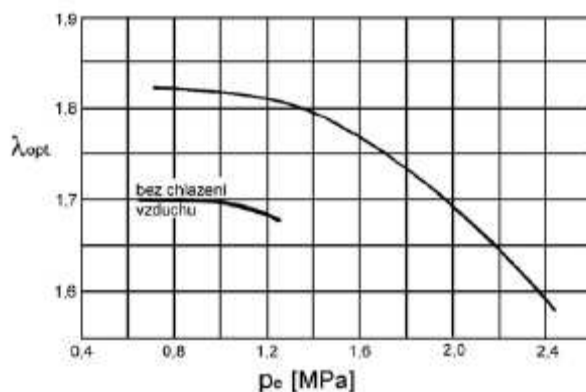
$p_e$  – střední efektivní tlak v motoru [Pa]

$H_u$  [J.kg<sup>-1</sup>] – dolní výhřevnost paliva, motorová nafta 42,5 MJ.kg<sup>-1</sup>

$\sigma_t$  [kg.kg<sup>-1</sup>] – Teoretická spotřeba vzduchu, který vyjadřuje, kolik kilogramů vzduchu je nutno použít pro dokonalé spálení paliva. Hodnota je konstantou pro daný typ paliva.  $\sigma_t = 14,5$ .

$\lambda$  – vzdušný součinitel vyjadřuje poměr mezi skutečným a teoreticky potřebným množstvím vzduchu pro spálení paliva. Nepřímo ovlivňuje velikost středního efektivního tlaku, má smysl ho zvyšovat jen omezeně. Pro jeho růst platí určitá omezení. Například z hlediska maximální teploty výfukových plynů z důvodu ochrany turbíny a turbínového kola a z hlediska maximálních spalovacích teplot (poškození výfukových ventilů nebo ventilových sedel apod.). Součinitel  $\lambda$  je důležitým regulačním členem pro zamezení poškození tepelným namáháním. U čtyřdobých vznětových motorů vybavených turbodmychadly se pohybuje od 1,2 až 6. Při hodnotě cca 1,8 jsou dosahovány nejnižší měrné spotřeby. Grafická závislost je na obr. 2.4.





Obr. 2.4 Závislost  $p_e$  na vzdušném součiniteli  $\lambda$ . [3]

$\sigma_t \cdot \lambda$  – skutečný směšovací poměr, tedy kolik kilogramů vzduchu ve směsi připadne na jeden kilogram paliva

$\rho_{pl}$  – hustota plnicího vzduchu jde výrazně zvýšit přeplňováním. Dalšího zvýšení hustoty a tím celkového objemu dopraveného množství vzduchu dosáhneme chlazením plnicího vzduchu. Díky tomu je možné zvyšovat dávku paliva v určitém rozsahu (hranice kouřivosti, tepelná ochrana apod.). Výsledkem je nárůst středního efektivního tlaku a úměrně tomu může růst i výkon motoru.

Hustota se získá ze vztahu (2.11), který vychází se základní stavové rovnice. Měrný objem je nahrazen obrácenou hodnotou hustoty. Dále je patrné ze vztahu (2.12) dle [3], že hustota plnicího vzduchu ovlivňuje plnicí respektive dopravní účinnost.

$$\rho_{pl} = \frac{p_s}{r \cdot T_s} \quad (2.11)$$

kde:

$\rho_{pl}$  – hustota plnicího vzduchu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$p_s$  – tlak plnicího vzduchu [Pa]

$r$  – měrná plynová konstanta vzduchu [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$T_s$  – teplota plnicího vzduchu [K]

$\eta_{pl}$  – plnicí účinnost lze ovlivnit průřezem sacích kanálů a ventilovým sedlem, časováním rozvodů, malým odporem sacího systému, rezonančním sacím potrubím nebo výfukem, který má velký vliv na vyplachování válce. S plnicí účinností souvisí dopravní (objemová) účinnost, která zohledňuje skutečné množství vzduchu dopraveného do válce motoru. Oboje určíme vztahy dle [3]

$$\eta_{pl} = \frac{m_s}{V_z \cdot \rho_{pl}} \quad (2.12)$$

$$\eta_d = \frac{m_s}{V_z \cdot \rho_{pl} \cdot \varphi_{pr}} \quad (2.13)$$

kde:

$\eta_{pl}$  – plnicí účinnost [1]

$\eta_d$  – dopravní (objemová) účinnost [1]

$m_s$  – množství vzduchu procházející sacím systémem motoru [kg]

$m_e$  – množství vzduchu, které se skutečně dostane do motoru [kg]

$V_z$  – zdvihový objem válce [m<sup>3</sup>]

$\rho_{pl}$  – hustota plnicího vzduchu ze vztahu (11) [kg.m<sup>-3</sup>]

$\varphi_{pr}$  – součinitel proplachu zjistíme vztahem (2.14) dle [3]

$$\varphi_{pr} = \frac{m_s}{m_e} \geq 1 \quad (2.14)$$

Obě dvě účinnosti jsou rovněž závislé na teplotě plnicího vzduchu a to tak, že s nárůstem teploty klesají.

Dosazením vztahu (2.11) do vztahu (2.10) a jeho následným upravením lze získat vztah pro výpočet plnicího tlaku vzduchu. Potom:

$$p_s = \frac{p_e \cdot r \cdot T_s \cdot \lambda \cdot \sigma_t}{H_u \cdot \eta_d \cdot \eta_i \cdot \eta_m} \quad (2.15)$$

kde:

$p_s$  – tlak plnicího vzduchu [Pa]

$p_e$  – střední efektivní tlak v motoru [Pa]

$r$  – měrná plynová konstanta vzduchu [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$T_s$  – teplota plnicího vzduchu [K]

$\lambda$  – vzdušný součinitel

$\sigma_t$  – teoretické množství vzduchu [kg.kg<sup>-1</sup>]

$H_u$  [J.kg<sup>-1</sup>] – dolní výhřevnost paliva, motorová nafta 42,5 MJ.kg<sup>-1</sup>

$\eta_d, \eta_i, \eta_m$  – dopravní (objemová), indikovaná a mechanická účinnost motoru [1]

Tlak plnicího vzduchu je přibližně roven rozdílu tlaku na výstupu z dmyhadla (označujeme jej  $p_{2k}$ ) a tlakové ztrátě v sacím systému.

Dopravní účinnost může teoreticky dosáhnout hodnoty větší než 1. A to pokud dojde k dokonalému naplnění celého prostoru válce vzduchem. Ve válci tedy nebudou žádné spaliny. Proto se doporučuje u přeplňovaných motorů vztahovat dopravní účinnost k celému objemu válce a ne jenom ke zdvihovému objemu válce.

$\eta_i$  – ovlivňuje ji promíslení směsi, vhodný průběh spalování (tvar spalovacího prostoru), komprese a chladicí systém motoru. Dosazením do vztahu (2.2) dostaneme:

$$\begin{aligned} A_i &= V_z \cdot p_{is} \\ A_i &= Q_p \cdot \eta_i \\ A_i &= H_u \cdot m_{pcy} \cdot \eta_i \Rightarrow \eta_i \\ \eta_i &= \frac{V_z \cdot p_{is}}{H_u \cdot m_{pcy}} \end{aligned} \quad (2.16)$$

$m_{pcy}$  – hmotnostní tok paliva na, jeden pracovní cyklus [ $\text{Kg} \cdot \text{cyklus}^{-1}$ ]

$\eta_m$  – ztráty lze dělit do tří kategorií:

- ztráty nezávislé na zatížení motoru. Patří sem pohon rozvodového mechanismu, agregátů, čerpadel, třecí ztráty od setrvačných sil, ventilační ztráty.
- ztráty závislé na zatížení (přeplňování). Jsou to třecí ztráty závislé na tlaku nad pístem (písty, kroužky, ložiska), pohon pro mechanická dmyhadla.
- ztráty spojené s výměnou obsahu válců. U atmosférických motorů je práce na výměnu obsahu válců záporná, ale u přeplňovaných motorů jak je zobrazuje obr. 2.1 je kladná.

## 2.6 Teoretické výpočty

V následující kapitole prezentuji na teoretických výpočtech jak se mění nebo nemění vybrané veličiny a parametry v závislosti na teplotě plnicího vzduchu. Přestože se jedná o teoretické výpočty, je potřeba pro dosažení určité přesnosti výsledků vstupní údaje kvalifikovaně (na základě zkušeností) zvolit nebo naměřit. Já jsem zvolil kombinaci obojího. např. spotřebu paliva, plnicí tlak apod. jsem použil z naměřených dat, ale hodnotu směšovacího poměru  $\lambda$  jsem na základě zkušeností zvolil, protože jsem neměl možnost ji naměřit.

### 2.6.1 Vliv teploty nasávaného vzduchu na tepelnou účinnost

Výpočet se vztahuje k teoretickému termodynamickému oběhu (viz. obr. 2.1). Vstupní hodnoty jsou vztaženy k měřicímu motoru. Hodnoty teplot  $t_{1m}$  jsem pro výpočet zvolil na 20 °C a 80 °C. Spotřebu paliva a další vstupní údaje jsem použil z experimentálního měření. Pro potvrzení předpokladu není potřeba počítat práci při výměně náplně. Výpočet tedy zahrnuje jen práci vysokotlaké části oběhu.

Vstupní údaje:

|  |  |
|--|--|
| - tlak v bodě 1 (tlak vzduchu na vstupu do válců motoru) | $p_1 = 0,225 \text{ MPa}$                                |
| - kompresní poměr motoru                                 | $\varepsilon_M = 16,5$                                   |
| - objem motoru   | $V_z = 1968 \text{ cm}^3$                                |
| - počet válců  | $i = 4, k = 1/2$ (čtyřtakt),                             |
| - otáčky motoru  | $n_m = 1750 \text{ min}^{-1}$                            |
| - hodinová spotřeba paliva                               | $M_P = 10,25 \text{ kg.h}^{-1}$                          |
| - dolní výhřevnost paliva                                | $H_u = 42500 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .                       |
| - koeficient polytropy                                   | $n = 1,36$ (1)   |
| - adiabatický exponent                                   | $\kappa = c_p/c_v$                                       |
| - měrná tepelná kapacita při stálém objemu               | $c_v = 0,825 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$           |
| - měrná tepelná kapacita při stálém tlaku                | $c_p = 1 + (0,00018.t) \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| - plynová konstanta pro vzduch                           | $r = 287,041 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$            |

V řešení není odvození. Jsou použity konečné vztahy. Jde jen o demonstraci výsledků. Počítá se s konstantní dávkou paliva pro obě vstupní teploty. Ve skutečnosti řídící jednotka motoru upravuje dávku paliva v závislosti na vstupní teplotě. Čím větší teplota plnicího vzduchu tím menší dávka paliva.

Se změnou teploty na počátku termodynamického oběhu a tím pádem i v ostatních bodech oběhu se mění i adiabatický exponent. S klesající teplotou na počátku oběhu klesá i adiabatický exponent, což se projeví na tepelné účinnosti. Nejprve tedy určíme změnu adiabatického exponentu.

### Změna adiabatického exponentu vlivem rozdílné teploty v bodě 1 [3].

$$\begin{aligned}c_p &= 1 + (0,00018 \cdot t) \\c_{p1} &= 1 + (0,00018 \cdot 20) = 1,0036 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \\c_{p2} &= 1 + (0,00018 \cdot 80) = 1,0144 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\end{aligned}\quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}\kappa_1 &= \frac{c_{p1}}{c_v} = \frac{1,0036}{0,825} = 1,216 \\ \kappa_2 &= \frac{c_{p1}}{c_v} = \frac{1,0144}{0,825} = 1,223\end{aligned}\quad (2.18)$$

### Výpočet objemů v bodech 1 a 2 pro jeden válec [6].

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_{Z1} + V_K}{V_K} \\ V_{Z1} &= \frac{V_Z}{i} = \frac{1,968 \cdot 10^{-3}}{4} = 4,92 \cdot 10^{-4} [\text{m}^3] \\ V_K &= V_2 = \frac{V_{Z1}}{\varepsilon - 1} = \frac{4,92 \cdot 10^{-4}}{16,5 - 1} = 3,17 \cdot 10^{-5} [\text{m}^3] \\ V_1 &= V_5 = V_{Z1} + V_K = 5,24 \cdot 10^{-4} [\text{m}^3]\end{aligned}\quad (2.19)$$

### Množství stlačeného vzduchu [6]

$$m_{vz} = \frac{p_1 \cdot V_1}{r \cdot T_1(T_2)} = \frac{0,21 \cdot 10^6 \cdot 5,24 \cdot 10^{-4}}{287,041 \cdot 293(353)} = \frac{1,308 \cdot 10^{-3} (1,086 \cdot 10^{-3})}{\text{kg}} \quad (2.20)$$

### Adiabatická komprese mezi body 1 a 2 [6]

$$\begin{aligned}p_1 \cdot V_1^{\kappa} &= p_2 \cdot V_2^{\kappa} \\ p_2^1 &= \frac{p_1 \cdot V_1^{\kappa_1}}{V_2^{\kappa_1}} = p_1 \cdot \varepsilon^{\kappa_1} = 0,225 \cdot 16,5^{\kappa_1} = 6,8 \text{ MPa} \\ p_2^2 &= \frac{p_1 \cdot V_1^{\kappa_2}}{V_2^{\kappa_2}} = p_1 \cdot \varepsilon^{\kappa_2} = 0,225 \cdot 16,5^{\kappa_2} = 6,94 \text{ MPa} \\ T_2^1 &= T_1^1 \cdot \frac{p_2 \cdot V_2}{p_1 \cdot V_1} = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa_1} \cdot \varepsilon^{-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{\kappa_1-1} = 537 \text{ K} \\ T_2^2 &= T_1^2 \cdot \varepsilon^{\kappa_2-1} = 660 \text{ K}\end{aligned}\quad (2.21)$$

### Izochorický přívod tepla [6]

Celkově přivedené  $Q_{p1}$  teplot zjistíme vynásobením hodinové spotřeby paliva s dolní výhřevností paliva. Přívod tepla za konstantního objemu  $Q_{pv1}$  je roven asi 68% a za

konstantního tlaku  $Q_{pp1}$  32% z celkového přívodu tepla.  $M_{p1}$  je dávka paliva na jeden pracovní cyklus.

$$Q_{p1} = M_{p1} \cdot H_u \quad (2.22)$$

$$M_{p1} = \frac{M_p}{n \cdot 60 \cdot i \cdot k} = \frac{10,25}{1750 \cdot 60 \cdot 4 \cdot 0,5} = 4,881 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \quad (2.23)$$

$$\underline{Q_{p1} = 2074 \text{ J}}$$

$$Q_{pv1} = 0,68 \cdot Q_{p1} = \underline{1411 \text{ J}}$$

$$Q_{pp1} = 0,32 \cdot Q_{p1} = \underline{663 \text{ J}}$$

V bodě 2 začíná přívod paliva. To znamená navýšení množství plnicího vzduchu  $m_{vz}$  o množství paliva  $M_{p1}$ .

$$m_z = m_{vz} + M_{p1} = 1,224 \cdot 10^{-3} + 4,881 \cdot 10^{-5} = \underline{1,2728 \cdot 10^{-3}} \quad (2.24)$$

Z přívodu tepla za konstantního objemu zjistíme teplotu a tlak v bodě 3.

$$Q_{pv1} = m_z \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) \Rightarrow T_3 \quad (2.25)$$

$$T_3^1 = T_2^1 + \frac{Q_{pv1}}{m_z \cdot c_v} = 537 + \frac{1411}{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 825} = 1881 \text{ K}$$

$$T_3^2 = T_2^2 + \frac{Q_{pv1}}{m_z \cdot c_v} = 660 + \frac{1411}{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 825} = 2004 \text{ K}$$

$$p_3^1 = p_4^1 = \frac{m_z \cdot r \cdot T_3^1}{V_3} = \frac{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 287,041 \cdot 1881}{3,17 \cdot 10^{-5}} = 21,7 \text{ MPa} \quad (2.26)$$

$$p_3^2 = p_4^2 = \frac{m_z \cdot r \cdot T_3^2}{V_3} = \frac{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 287,041 \cdot 2004}{3,17 \cdot 10^{-5}} = 23,1 \text{ MPa}$$

### Izobarický přívod tepla v bodech 3 – 4 [6]

$$p_4 = p_3$$

$$T_4^1 = T_3^1 + \frac{Q_{pp1}}{m_z \cdot c_{p1}} = 1881 + \frac{663}{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 1003,6} = 2402 \text{ K} \quad (2.25)$$

$$T_4^2 = T_3^2 + \frac{Q_{pp1}}{m_z \cdot c_{p2}} = 2004 + \frac{663}{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 1014,4} = 2519 \text{ K}$$

$$V_4^1 = \frac{m_z \cdot r \cdot T_4^1}{p_4^1} = \frac{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 287,041 \cdot 2402}{21,7 \cdot 10^6} = 4,04 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (2.26)$$

$$V_4^2 = \frac{m_z \cdot r \cdot T_4^2}{p_4^2} = \frac{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 287,041 \cdot 2519}{23,1 \cdot 10^6} = 3,98 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

### Polytropická expanze 4 – 5 [6]

$$p_5^1 = p_4^1 \cdot \frac{V_4^{1^n}}{V_5^n} = 21,7 \cdot \frac{4,04 \cdot 10^{-51,36}}{5,24 \cdot 10^{-41,36}} = 0,665 \text{ MPa} \quad (2.21)$$

$$p_5^1 = p_4^1 \cdot \frac{V_4^{1^n}}{V_5^n} = 23,1 \cdot \frac{3,98 \cdot 10^{-51,36}}{5,24 \cdot 10^{-41,36}} = 0,693 \text{ MPa}$$

$$T_5^1 = \frac{p_5^1 \cdot V_5}{m_z \cdot r} = \frac{0,665 \cdot 10^6 \cdot 5,24 \cdot 10^{-4}}{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 287,041} = 954 \text{ K} \quad (2.26)$$

$$T_5^2 = \frac{p_5^2 \cdot V_5}{m_z \cdot r} = \frac{0,693 \cdot 10^6 \cdot 5,24 \cdot 10^{-4}}{1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 287,041} = 994 \text{ K}$$

### Izochorický odvod tepla 5 – 1 [6]

$$Q_{o1} = m_z \cdot c_v \cdot (T_5^1 - T_1^1) = 1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 825 \cdot (954 - 293) = 694 \text{ J} \quad (2.25)$$

$$Q_{o2} = m_z \cdot c_v \cdot (T_5^2 - T_1^2) = 1,2728 \cdot 10^{-3} \cdot 825 \cdot (994 - 353) = 673 \text{ J}$$

### Tepelná účinnost [6]

$$\eta_{t1} = \frac{Q_{p1} - Q_{o1}}{Q_{p1}} = \frac{2074 - 694}{2074} = 0,665 \quad (2.27)$$

$$\eta_{t2} = \frac{Q_{p1} - Q_{o2}}{Q_{p1}} = \frac{2074 - 673}{2074} = 0,676$$

Výpočtem se prokázalo, že chlazení plnicího vzduchu je z pohledu teoretické tepelné účinnosti termodynamického oběhu nevýhodné. S klesající teplotou plnicího vzduchu klesá teplo přivedené do okruhu v bodě jedna (teplo přivedené palivem v případě konstantní dávky paliva zůstává stejné, ale při provozu motoru, kdy dávka paliva je mimo jiné určována i podle teploty plnicího vzduchu, může podle provozního režimu docházet ke snížení dávky paliva s rostoucí teplotou plnicího vzduchu) a zároveň se zvyšuje teplo odvedené. Z čehož vyplývá, že klesá tepelná účinnost oběhu. Je tedy zřejmé, že vyšší tepelné účinnosti budou dosahovat motory bez chlazení plnicího vzduchu. Nutno podotknout, že se, ale jedná jen o jedno složku tvořící efektivní (celkovou) účinnost motoru.

Dále je z výsledků patrné, že teplota plnicího vzduchu ovlivňuje teplotu výfukových plynů na konci oběhu. S poklesem teploty výfukových plynů klesá i energie plynů, která se využívá k pohonu turbodmychadla. Obzvláště v poslední době se díky

vývoji v oblasti materiálů turbínových skříní (větší odolnost vůči vysokým teplotám a s tím související životnost) stále zvyšuje teplota výfukových plynů s cílem využít vyšší energie teplejších výfukových plynů a tím tak dosáhnout větší účinnosti turbodmychadla. U vznětových motorů jsou v současnosti turbodmychadla konstruována, na teploty výfukových plynů 830 - 860 °C [7].

Významněji může tepelnou účinnost ovlivnit jen stupeň komprese, množství přivedeného paliva, kvalita spalování a tepelné ztráty motoru (prostup tepla). Stupeň komprese je omezen zejména kvůli namáhání motoru a také hlučnosti, množství paliva je omezeno směšovacím poměrem s jeho snižováním by došlo zejména k nárůstu kouřivosti. Kvalita a rychlost spalování jsou dány hlavně tvarem spalovacího prostoru a tvorbou směsi ve spalovacím prostoru.

## 2.6.2 Vliv teploty nasávaného vzduchu na výkon

### Zadané parametry:

- zdvihový objem motoru  $V_z = 1968 \text{ cm}^3$
- teplota plnicího vzduchu za mezichladičem  $t_{lm} = 20^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$
- relativní plnicí tlak nasávaného vzduchu za mezichladičem  $p_{lm} = 0,142 \text{ MPa}$
- čtyřdobý motor  $k = 0,5$ ,
- otáčky  $n = 1750 \text{ min}^{-1}$
- součinitel přebytku vzduchu  $\lambda = 1,3$  (pro režim  $\alpha = 100\%$ )
- součinitel přebytku vzduchu  $\lambda = 1,65$  (pro režim  $\alpha = 50\%$ )
- kompresní poměr motoru  $\varepsilon = 16,5$
- dolní výhřevnost paliva  $H_u = 42500 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (nafta)
- teoretické množství vzduchu  $\sigma_t = 14,5 \text{ kg.kg}^{-1}$
- efektivní účinnost  $\eta_e = 0,4$  (odhad, u vznětových motorů je až 0,45),
- dopravní (objemová) účinnost  $\eta_d = 0,9$  (odhad může být až přes 1).

### Řešení

Nejdříve potřebuji určit hustotu vzduchu  $\rho_{pl}$  v sacím potrubí motoru. Tu získám z upravené stavové rovnice ideálního plynu. Do stavové rovnice je potřeba dosadit absolutní plnicí tlak  $p_{lmA}$  v sacím potrubí před vstupem do motoru. Atmosférický tlak



naměřený diagnostickým programem VCDS  $p_a = 982$  mbar. Absolutní tlak se rovná součtu relativního a atmosférického.

$$\begin{aligned} p_{1mA} &= p_a + p_{1m} \\ p_{1mA} &= 982 + 1420 \\ p_{1mA} &\cong 2400 \text{ [mbar]} = 0,24 \text{ [MPa]} = 240000 \text{ [Pa]} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \rho_{p1} &= \frac{p_{1mA}}{r \cdot T_{1m1}} = \frac{240000}{287 \cdot (273,15 + 20)} = 2,853 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \\ \rho_{p2} &= \frac{p_{1mA}}{r \cdot T_{1m2}} = \frac{240000}{287 \cdot (273,15 + 80)} = 2,368 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \end{aligned} \quad (2.29)[6]$$

Dále musím zjistit množství vzduchu nasávaného do motoru, čili hmotnostní průtok vzduchu .

$$\begin{aligned} M_{vz1,2} &= V_z \cdot \rho_{p1,2} \cdot n \cdot k \cdot \eta_d \\ M_{vz1} &= 1,968 \cdot 10^{-3} \cdot 2,853 \cdot (1750 \cdot 60) \cdot 0,5 \cdot 0,9 = 265,3 \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \\ M_{vz2} &= 1,968 \cdot 10^{-3} \cdot 2,368 \cdot (1750 \cdot 60) \cdot 0,5 \cdot 0,9 = 220,2 \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \end{aligned} \quad (2.30)[6]$$

Při známém hmotnostním průtoku vzduchu určím hodinovou spotřebu paliva a to ze vztahu:

$$\lambda = \frac{M_{vz}}{M_p \cdot \sigma_t} \Rightarrow M_p = \frac{M_{vz}}{\lambda \cdot \sigma_t} \quad (2.31) [6]$$

$$\begin{aligned} M_{p1,2} &= \frac{M_{vz1,2}}{\lambda \cdot L_t} \\ M_{p1} &= \frac{265,3}{1,3 \cdot 14,5} = 14,07 \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \\ M_{p2} &= \frac{220,2}{1,3 \cdot 14,5} = 11,67 \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}] \end{aligned}$$

Pak vypočítáme tepelný tok přivedený palivem, resp. teplo přivedené palivem

$$\begin{aligned} Q_{p1,2} &= M_{p1,2} \cdot H_{\ddot{u}} \cdot \frac{1}{3600} \\ Q_{p1} &= 14,07 \cdot 42500 \cdot \frac{1}{3600} = 166,1 \text{ [kW]} \\ Q_{p2} &= 11,67 \cdot 42500 \cdot \frac{1}{3600} = 137,8 \text{ [kW]} \end{aligned} \quad (2.32) [6]$$

Efektivní výkon pak podle vztahu

$$P_{e1,2} = Q_{p1,2} \cdot \eta_e \quad (2.33) [6]$$

$$P_{e1} = 166,1 \cdot 0,4 = 66,4 [kW]$$

$$P_{e2} = 137,8 \cdot 0,4 = 55,12 [kW]$$

Výpočet prokázal, že teplota nasávaného vzduchu má významný vliv na hustotu plnicího vzduchu, která tím pádem ovlivňuje všechny ostatní parametry. Rozdíl teplot plnicího vzduchu  $t_{lm} = 20^\circ\text{C}$  a  $t_{lm} = 80^\circ\text{C}$  způsobí teoretický rozdíl těchto parametrů cca 17%. Z důvodu zjednodušení je nutné brát výsledky s určitou rezervou, což bude dokázáno experimentálním měřením. Ve výpočtu není například zohledněn vliv okolí na mechanickou účinnost, objemovou účinnost, regulace lambda (při změně  $t_{lm}$  lambda regulace mění směšovací poměr palivo/vzduch, se stoupající teplotou dochází k ochuzování směsi) apod.

Výpočty při ostatních měřených režimech jsem provedl tabulkově. Kompletní výsledky jsou v příloze D.

### **2.6.3 Vliv teploty nasávaného vzduchu na plnicí a dopravní (objemovou) účinnost**

Plnicí účinnost je definována jako poměr čerstvé směsi, která zůstane ve válci motoru po uzavření sacích ventilů a množství vzduchu odpovídající zdvihovému objemu válce.

Dopravní účinnost je definována jako poměr skutečného množství vzduchu proudícího sacím systémem motoru ku teoretickému množství vzduchu, který se rovná zdvihovému objemu motoru. Do vztahů pro výpočet obou účinností vstupuje hustota plnicího vzduchu. Je tedy zřejmé, že obě účinnosti se mění v závislosti na teplotě nasávaného vzduchu.

### Plnicí účinnost

$$\eta_{pl} = \frac{m_e}{m_z} \quad (2.34) [6]$$

kde:

$\eta_{pl}$  – plnicí účinnost

$m_e$  – efektivní průtok čerstvé náplně, která zůstane ve válci motoru

$m_z$  – hmotnostní průtok čerstvého vzduchu odpovídající zdvihovému objemu válce při dané hustotě vzduchu. Vypočítá se podle vztahu z předchozího příkladu.

### Dopravní (objemová) účinnost

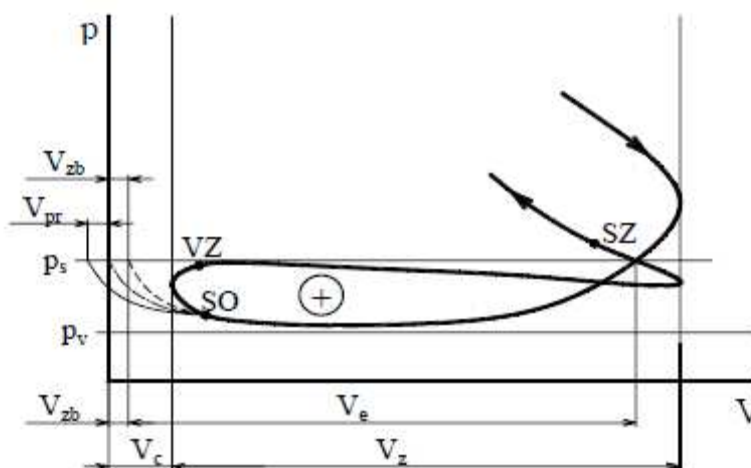
$$\eta_d = \frac{m_{vz}}{m_z} \quad (2.35) [6]$$

kde:

$\eta_{pl}$  – plnicí účinnost

$m_{vz}$  – průtok sacím systémem motoru

Při výměně obsahu válce u přeplňovaného motoru dochází k proplachování, kdy část směsi, která prochází válcem, prochází do výfuku z důvodu tlaku plnicího vzduchu a většího překrytí ventilů. Obr. 2.5 zobrazuje v p-V diagramu zidealizovaný průběh výměny obsahu válce přeplňovaného motoru. Je z něj patrné, že při kladném rozdílu plnicího tlaku  $p_s$  a tlaku výfukových plynů  $p_v$  je i při nedokonalém proplachu efektivní objem směsi  $V_e$  procházející do válce motoru větší než zdvihový objem válce  $V_z$ . Objem zbylých spalín  $V_{zb}$  je menší než kompresní objem  $V_c$ . Při dokonalém proplachu bude objem zbylých spalín  $V_{zb} = 0$ . Zavádíme tedy pojem součinitel proplachu  $\phi_{pr}$ , který získáme ze vztahu 2.14.



Obr. 2.5 Zidealizovaný průběh výměny obsahu válce přeplňovaného motoru [3]

Pro výpočet musíme znát tyto vstupní parametry:

- zdvihový objem motoru  $V_z = 1968 \text{ cm}^3$
- otáčky motoru  $n_m = 1750 \text{ min}^{-1}$
- čtyřdobý motor  $k = 0,5$
- průtok vzduchu naměřený před dmychadlem  $m_{vz} = 1135 \text{ mg.zdvih}^{-1}$  pro  $t_{lm1}$  a 1017 pro  $t_{lm2}$  (použil jsem hodnoty naměřené snímačem množství nasávaného vzduchu tzv. MAF senzorem a zaznamenané programem VCDS během experimentálního měření)
- součinitel proplachu válce  $\phi_{pr} = 1,14$  (tj. 14 % z čerstvé náplně odejde do výfuku, hodnotu jsem použil z referenčního příkladu)
- hustota atmosférického vzduchu  $\rho_a = 1,18 \text{ kg.m}^{-3}$
- atmosférický tlak  $p_a = 0,0982 \text{ MPa}$
- relativní plnicí tlak nasávaného vzduchu za mezichladičem  $p_{lm} = 0,142 \text{ MPa}$
- teplota nasávaného vzduchu za mezichladičem  $t_{lm1,2} = 20^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$ ,
- plynová konstanta pro vzduch  $r = 287 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- počet válců  $i = 4$ .

Řešení:

Nejprve musím převést hmotnostní průtok vzduchu naměřený před dmychadlem z  $\text{mg.zdvih}^{-1}$  na  $\text{kg.h}^{-1}$  a poté na objemový průtok.

a) převod z jednotky  $\text{mg.zdvih}^{-1}$  na  $\text{kg.h}^{-1}$  dle [8]

$$\text{hmotnost v } [\text{kg.h}^{-1}] = \text{hmotnost v } [\text{mg.zdvih}^{-1}] \cdot n \cdot i \cdot 60 / (2 \cdot 10^6) \quad (2.37)$$

$$\text{hmotnost v } [\text{kg.h}^{-1}] = 1135 \cdot 1750 \cdot 4 \cdot 60 / 2000000$$

$$\text{hmotnost v } [\text{kg.h}^{-1}] = 238,35 \text{ pro } t_{lm1} = 20^\circ\text{C}$$

$$\text{hmotnost v } [\text{kg.h}^{-1}] = 1017 \cdot 1750 \cdot 4 \cdot 60 / 2000000$$

$$\text{hmotnost v } [\text{kg.h}^{-1}] = 213,57 \text{ pro } t_{lm1} = 80^\circ\text{C}$$

b) převod z hmotnostního toku na objemový určím z následujícího vztahu

$$V_{mz} = \rho_a \cdot V_{vz} \Rightarrow V_{vz1} = \frac{V_{mz1}}{\rho_a} = \frac{238,35}{1,18} = 202 [\text{m}^3.\text{h}^{-1}] \quad (2.37)$$

$$V_{vz2} = \frac{V_{mz2}}{\rho_a} = \frac{213,57}{1,18} = 181 [\text{m}^3.\text{h}^{-1}]$$

Před výpočtem objemové účinnosti potřebuji nejprve zjistit hustoty plnicího vzduchu před vstupem do motoru  $\rho_{1m}$  pro dané teploty  $t_{1m1,2}$ . Ty získám ze stavové rovnice plynu.

$$p_{1mA} \cdot v_{1m} = r \cdot T_{1m} \quad (2.29)[6]$$

$$\begin{aligned} p_{1mA} \cdot \frac{1}{\rho_{1m}} &= r \cdot T_{1m} \Rightarrow \rho_{1m} = \frac{p_{1mA}}{r \cdot T_{1m}} = \frac{p_a + p_{1m}}{r \cdot T_{1m}} \\ \rho_{1m1} &= \frac{p_{1m}}{r \cdot T_{1m1}} = \frac{240000}{287 \cdot (273,15 + 20)} = 2,853 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} \\ \rho_{1m2} &= \frac{p_{1m}}{r \cdot T_{1m2}} = \frac{240000}{287 \cdot (273,15 + 80)} = 2,368 \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} \end{aligned}$$

Pak objemové účinnosti jsou:

$$\begin{aligned} \eta_{d1} &= \frac{m_{vz}}{m_z} = \frac{\rho_a \cdot V_{vz1}}{\rho_{1m1} \cdot V_z \cdot n \cdot k} = \frac{1,18 \cdot \left(\frac{202}{3600}\right)}{2,853 \cdot 1,968 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{1750}{60}\right) \cdot 0,5} = \frac{0,066}{0,082} = 0,805 \\ \eta_{d2} &= \frac{\rho_a \cdot V_{vz2}}{\rho_{1m2} \cdot V_z \cdot n \cdot k} = \frac{1,18 \cdot \left(\frac{181}{3600}\right)}{2,368 \cdot 1,968 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{1750}{60}\right) \cdot 0,5} = \frac{0,059}{0,068} = 0,87 \end{aligned} \quad (2.35)[6]$$

K výpočtu plnicí účinnosti je nejprve třeba znát  $m_e$  – efektivní průtok čerstvé náplně upravený na hmotnostní průtok. Ten získám ze vztahu:

$$m_{e1,2} = \frac{m_{vz1,2}}{\phi_{pr}} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} m_{e1} &= \frac{m_{vz1}}{\phi_{pr}} = \frac{\rho_a \cdot V_{vz1}}{\phi_{pr}} = \frac{1,18 \cdot \frac{202}{3600}}{1,14} = 0,058 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]} \\ m_{e2} &= \frac{m_{vz2}}{\phi_{pr}} = \frac{\rho_a \cdot V_{vz2}}{\phi_{pr}} = \frac{1,18 \cdot \frac{181}{3600}}{1,14} = 0,052 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]} \end{aligned}$$

Plnicí účinnost potom získám ze vztahu

$$\eta_{pl} = \frac{m_e}{m_z} = \frac{m_e}{\rho_{1m} \cdot V_z \cdot n \cdot k} \text{ nebo } \eta_{pl} = \frac{\eta_d}{\phi_{pr}} \quad (2.34)$$

$$\eta_{pl1} = \frac{M_{e1}}{\rho_{1m1} \cdot V_z \cdot n \cdot k} = \frac{0,058}{2,853 \cdot 1,968 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{1750}{60}\right) \cdot 0,5} = \frac{0,058}{0,082} = 0,707$$

$$\eta_{pl2} = \frac{M_{e2}}{\rho_{1m2} \cdot V_z \cdot n \cdot k} = \frac{0,052}{2,368 \cdot 1,968 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{1750}{60}\right) \cdot 0,5} = \frac{0,052}{0,068} = 0,765$$

Jak je patrné ze vztahu pro výpočet objemové účinnosti, vstupuje do něj nejen hustota atmosférického, ale i plnicího vzduchu, z čehož vyplývá, že se objemová účinnost mění s teplotou plnicího vzduchu. Výpočet potvrdil, že objemová účinnost se stoupající teplotou plnicího vzduchu resp. s klesající hustotou plnicího vzduchu roste, a proto jsou její hodnoty i přes větší množství nasávaného vzduchu v maximálním zatížení motoru nižší než při polovičním zatížení. Zbývající vstupní proměnou, která se podílí na velikosti objemové účinnosti jsou otáčky motoru, se kterými souvisí větší množství nasávaného vzduchu.

Souhrnná tabulka tab. 2.1 zobrazuje kompletní vypočítané hodnoty objemové účinnosti. Nejvyšší účinnosti 0,917 se dosahuje při  $n_m$  3500 min<sup>-1</sup> a polovičním zatížení motoru.

Tab. 2.1 Souhrnný výpočet objemové účinnosti

| 1750/50             |                                 |                                 |          | 1750/100            |                                 |                                 |          |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------|
| $n_m$               | $\rho_{1m}$                     | $M_{vz}VCDS$                    | $\eta_v$ | $n_m$               | $\rho_{1m}$                     | $M_{vz}VCDS$                    | $\eta_v$ |
| $[\text{min}^{-1}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$ | [1]      | $[\text{min}^{-1}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$ | [1]      |
| 1750,00             | 2,551                           | 217,6                           | 0,825    | 1750,00             | 2,842                           | 238,5                           | 0,812    |
| 1750,00             | 2,469                           | 211,7                           | 0,83     | 1750,00             | 2,749                           | 233,8                           | 0,823    |
| 1750,00             | 2,390                           | 208,0                           | 0,842    | 1750,00             | 2,662                           | 229,0                           | 0,833    |
| 1750,00             | 2,319                           | 203,5                           | 0,849    | 1750,00             | 2,579                           | 225,3                           | 0,845    |
| 1750,00             | 2,248                           | 198,2                           | 0,853    | 1750,00             | 2,502                           | 221,4                           | 0,857    |
| 1750,00             | 2,183                           | 195,2                           | 0,866    | 1750,00             | 2,430                           | 213,3                           | 0,850    |
| 1750,00             | 2,121                           | 193,1                           | 0,881    | 1750,00             | 2,362                           | 213,6                           | 0,875    |
| 2500/50             |                                 |                                 |          | 2500/100            |                                 |                                 |          |
| $n_m$               | $\rho_{1m}$                     | $M_{vz}VCDS$                    | $\eta_v$ | $n_m$               | $\rho_{1m}$                     | $M_{vz}VCDS$                    | $\eta_v$ |
| $[\text{min}^{-1}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$ | [1]      | $[\text{min}^{-1}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$ | [1]      |
| 2500,00             | 2,760                           | 350,4                           | 0,86     | 2500,00             | 2,958                           | 370,6                           | 0,849    |
| 2500,00             | 2,669                           | 342,9                           | 0,87     | 2500,00             | 2,862                           | 362,3                           | 0,858    |
| 2500,00             | 2,586                           | 334,5                           | 0,877    | 2500,00             | 2,771                           | 356,6                           | 0,872    |
| 2500,00             | 2,504                           | 328,0                           | 0,887    | 2500,00             | 2,686                           | 348,3                           | 0,879    |
| 2500,00             | 2,430                           | 319,6                           | 0,891    | 2500,00             | 2,606                           | 339,0                           | 0,881    |
| 2500,00             | 2,360                           | 315,2                           | 0,905    | 2500,00             | 2,530                           | 332,9                           | 0,892    |
| 2500,00             | 2,294                           | 309,6                           | 0,915    | 2500,00             | 2,458                           | 326,9                           | 0,901    |
| 3500/50             |                                 |                                 |          | 3500/100            |                                 |                                 |          |
| $n_m$               | $\rho_{1m}$                     | $M_{vz}VCDS$                    | $\eta_v$ | $n_m$               | $\rho_{1m}$                     | $M_{vz}VCDS$                    | $\eta_v$ |
| $[\text{min}^{-1}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$ | [1]      | $[\text{min}^{-1}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ | $[\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}]$ | [1]      |
| 3500,00             | 2,653                           | 475,8                           | 0,868    | 3500,00             | 3,010                           | 530,4                           | 0,853    |
| 3500,00             | 2,567                           | 465,7                           | 0,878    | 3500,00             | 2,913                           | 519,7                           | 0,864    |
| 3500,00             | 2,485                           | 454,9                           | 0,886    | 3500,00             | 2,820                           | 508,5                           | 0,873    |
| 3500,00             | 2,409                           | 445,0                           | 0,894    | 3500,00             | 2,734                           | 496,3                           | 0,878    |
| 3500,00             | 2,338                           | 435,4                           | 0,901    | 3500,00             | 2,653                           | 483,7                           | 0,882    |
| 3500,00             | 2,270                           | 426,0                           | 0,908    | 3500,00             | 2,565                           | 473,0                           | 0,892    |
| 3500,00             | 2,193                           | 415,7                           | 0,917    | 3500,00             | 2,389                           | 444,4                           | 0,900    |

### 3 Sestavení metodiky měření a vyhodnocení

Účelem zkoušek je naměřit, jak se se změnou teploty nasávaného vzduchu mění parametry vznětového turbodmychadlem přeplňovaného motoru a jednotlivé tlaky a teploty měřené na různých místech motoru nebo jeho okolí. Jelikož se jedná o měření na motorové brzdě, patří mezi měřené parametry efektivní hodnoty výkonu a točivého momentu motoru. Dále mezi měřené parametry patří hodinová spotřeba paliva, což je také nezbytný parametr, resp. vstupní parametr pro teoretické výpočty. Naměřené hodnoty výkonu a točivého momentu také slouží pro srovnání s hodnotami vypočtenými, stanovení přesnosti těchto výpočtů a jako vstupní údaje pro další výpočty.

Měření teplot a tlaků zejména v sacím a výfukovém systému jsem využil jako vstupní údaje pro výpočty a pro grafické znázornění závislosti na teplotě nasávaného vzduchu. Pro měření tlaku byla použita jednotka bar případně mbar. Nejedná se sice o základní jednotky soustavy SI, ale o jednotky běžně v praxi využívané, proto jsem je ponechal a nepřeváděl (poměr je  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ) na základní jednotky soustavy SI.

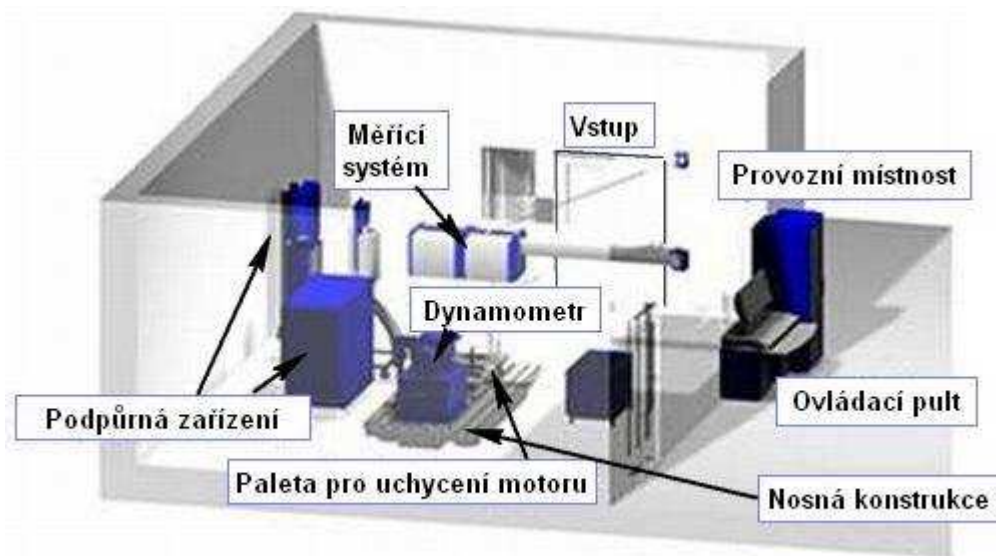
Vlastní měření proběhlo na motorovém zkušebním stavu. Ten je vybaven motorovou brzdou (dynamometrem), podpůrnými a měřicími zařízeními. Dynamometr pracuje na principu vířivých proudů a používá se k zatěžování motoru. Zařízení zabezpečující dodávku a chlazení paliva (nahrazení podávacího čerpadla a chladiče paliva), chlazení chladicí kapaliny motoru (nahrazení vodního chladiče), chlazení nasávaného vzduchu (náhrada mezichladiče stlačeného vzduchu) a zařízení pro ovládání pedálu plynu, resp. zprostředkování požadavku na výkon (nahrazení řidiče) patří mezi podpůrná zařízení, bez kterých by nebylo možné motor na motorové stanici provozovat. Současně tato zařízení měří určité veličiny vztahující se ke své funkci, např. dynamometr točivý moment, chladicí zařízení teploty na vstupu a na výstupu z motoru apod.

Další zařízení jsou jen měřicí. Patří sem zařízení na měření spotřeby paliva, zařízení pro měření tlaků (měří se statický tlak) a teplot na různých místech motoru.

#### 3.1 Technická zařízení

Stručný popis motoru a ostatního technického zařízení použitého během simulace teploty nasávaného vzduchu a měření výkonových a ostatních parametrů motoru. Celkový pohled na uspořádání provozní místnosti je na obr. 3.1.





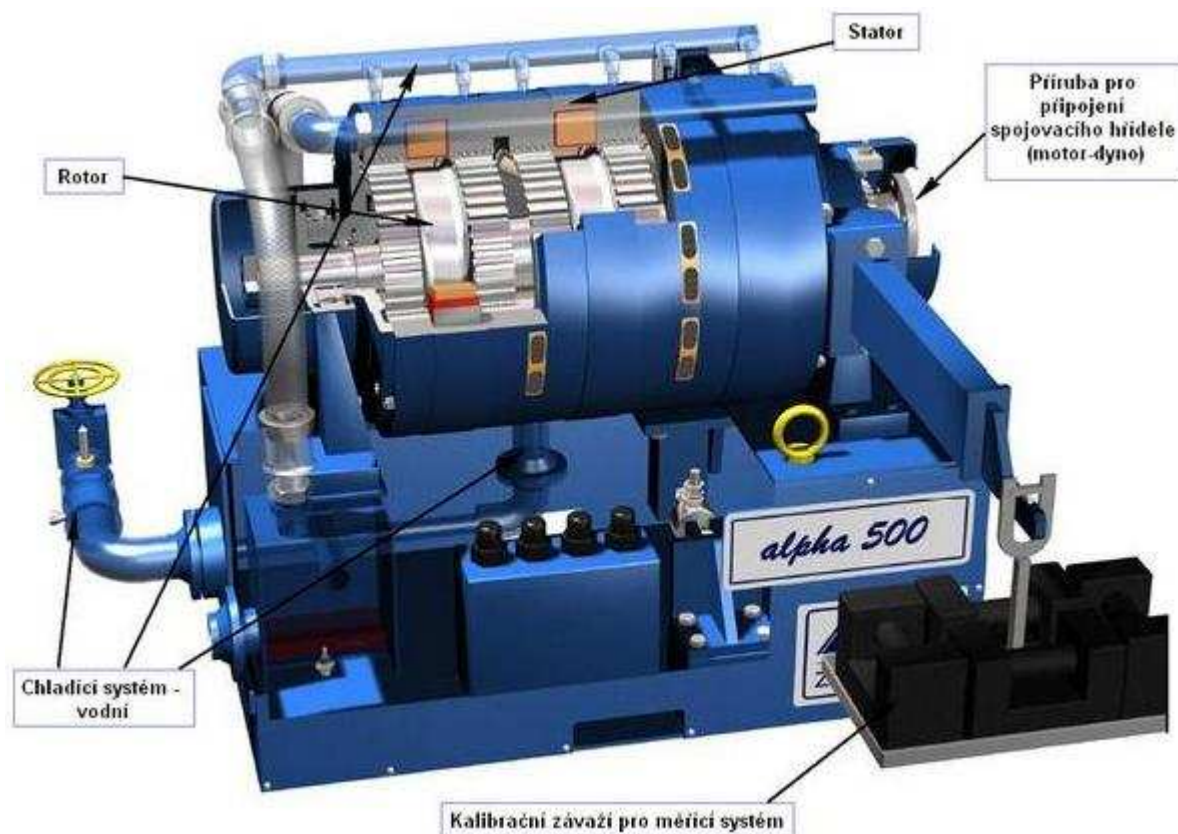
Obr. 3.1 Náhled provozní místnosti [9]

### 3.1.1 Dynamometr

Motor byl provozován na pasivním (bez možnosti cizího pohnu) dynamometru pracujícím na principu vířivých proudů. Dynamometr je zařízení, které se obecně používá pro zatěžování pohonných jednotek. Vířivé proudy vytvářejí brzdny účinek. Hlavními částmi dynamometru je rotor a stator. Rotor je ocelový a tvarem připomíná ozubené kolo. Stator je budící cívka, kterou protéká stejnosměrný proud. Ten budí v magnetickém obvodu magnetický tok. Při otáčení rotoru v magnetickém poli statoru se mění magnetický odpor vlivem střídání zubů a mezer rotoru. Dochází tak ke změně magnetického toku. Jeho změna způsobuje indukované napětí v magnetickém obvodu, v důsledku toho začnou obvodem protékat vířivé proudy. Ty způsobí brzdny moment. Velikost tohoto momentu je říditelná změnou proudu v budící cívce. [10]

Energie vířivých proudů je dána energií, která je dodána zkoušenou pohonnou jednotkou, a mění se v tělese magnetického obvodu vířivé brzdy na teplo. K odvodu tohoto tepla musí být vířivá brzda vybavena účinným chladičným systémem. [10]

Použitý dynamometr zajišťuje přesnost měření točivého momentu 0,2 % a otáček  $\pm 1 \text{ min}^{-1}$  [9].



Obr. 3.3 Dynamometr –řez [9]

### 3.1.2 Paletový systém a spojovací hřídel

Paletový systém slouží pro pevné a přesné uchycení motoru vůči dynamometru respektive nastavitelné kotvící desce uložené na nosné konstrukci.

Spojovací hřídel je výkyvná hřídel přenášející točivý moment mezi motorem a dynamometrem. Také ovlivňuje vibrace celého systému.



Obr. 3.4 Spojovací hřídel [9]



Obr. 3.5 Paleta pro uložení motoru [9]

### 3.1.3 Ovládání pedálu plynu

Pro určování požadovaného zatížení motoru slouží zařízení pro nastavování polohy pedálu plynu. Pedál plynu se přes ovládací táhlo ovládá krokovým servomotorem. Napájecí zdroj a řídicí elektronika pro aktuátor plynu jsou umístěny v samostatné skříni viz. obr. 3.6. Maximální posuv je 110 mm, maximální síla pro tah a tlak je 120 N, rychlost pohybu je  $0.5 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ , opakovatelná přesnost polohy je  $\pm 0.05 \text{ mm}$ . Okolní teplota pro správnou funkci by měla být v rozsahu  $-30^{\circ}\text{C}$  až  $+30^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 3.6 Nastavovač pedálu plynu a řídicí zařízení.[9]

### 3.1.4 Palivový systém

Palivové zařízení zabezpečuje tyto funkce:

- velice přesnou dodávku paliva k motoru a regulaci vstupního tlaku paliva do motoru
- udržování teploty paliva na požadované hodnotě
- měření spotřeby paliva motoru po celou dobu chodu nebo jen v pravidelných intervalech

Provozní a technické parametry

- měřící rozsah spotřeby paliva  $0 - 125 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  resp.  $0 - 165 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$  při hustotě paliva  $0,75 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$
- systémová chyba měření  $0,12 \%$
- maximální frekvence měření  $20 \text{ Hz}$
- počet měření pro výpočet střední hodnoty 1 až 99
- pracovní teplota okolí  $5$  až  $50^{\circ}\text{C}$
- podávací tlak paliva  $0,1$  až  $0,8 \text{ bar}$ , z výstupním regulátorem tlaku až  $6 \text{ bar}$

- teplotní rozsah paliva 10 až 80 °C, dolní teplota je omezena teplotou chladicí vody, horní teplota závisí na teplotě paliva vystupující z motoru [9]

### 3.1.5 Chladicí systém motoru

Má za úkol udržovat chladicí kapalinu na požadované teplotě. Správná teplota je důležitá z hlediska opakovatelnosti zkoušek. Zajistí se tím stejné termodynamické a mechanické parametry. Chladicí systém je dvouokruhový. V primárním okruhu je chladicí kapalina v nejvyšším poměru 1:1 (destilovaná voda : glykol). Primární okruh je napojen na motor. V sekundárním oběhu bývá zpravidla čistá voda. Tento okruh je spojen s vnějším chladicím systémem a s chladicí věží.

Některé parametry chladicího zařízení:

- chladicí výkon 200 kW
- výkon elektrického vyhřívání 18 kW
- pracovní teplota, v primárního okruhu 10 až 140 °C, v sekundárním 0 až 30 °C
- přesnost udržení teploty na vstupu do motoru při stálém režimu  $\pm 0,7$  °C nebo vyšší, na výstupu z motoru  $\pm 2$  °C.
- pracovní tlaky, v primárním okruhu 0 až 1,4 bar, v sekundárním okruhu 2,5 až 6 bar [9]



Obr. 3.7 Zařízení pro udržování zvolené teploty chladicí kapaliny [9]

### 3.1.6 Chladicí zařízení nasávaného vzduchu do motoru

Zajišťuje udržování teploty nasávaného vzduchu na předvolené hodnotě. Mezichladič pracuje jako tepelný výměník vzduch-voda. Vzduch na výstupu z kompresorové skříně může při teplotě okolí přes 35 °C (teplota při provozu na motorové stanici) dosáhnout až 200 °C.

Teplý nasávaný vzduch tedy předává energii studenější vodě, která koluje sekundárním okruhem. Teplota vody je rovněž ovlivněna teplotou okolí a pohybuje se mezi 0 až 35 °C. Samozřejmě, že teplota vody ovlivňuje účinnost teploty nasávaného vzduchu.

Některé parametry chladicího zařízení:

- rozsah teploty nasávaného vzduchu 20 až 80 °C , spodní teplota je omezena teplotou chladicí vody v sekundárním okruhu, horní teplota je dána pro každý motor
- přesnost udržení předvolené teploty  $\pm 0,50$  °C
- teplota vody v sekundárním okruhu 0 až 35 °C
- maximální tlak nasávaného vzduchu 3,5 bar (absolutní tlak)[9]



Obr. 3.8 Zařízení pro chlazení nasávaného vzduchu [9]

### 3.1.7 Měření teplot a tlaků

Pro měření teplot na různých místech sacího systému byl použit odporový snímač teploty Pt100 TP600 a pro měření ve výfukovém systému termočlánek typu K.

Pt100 má měřicí rozsah – 200 °C až + 600 °C. Princip měření spočívá ve změně elektrického odporu platinového drátu v závislosti na teplotě. Třída přesnosti A. To znamená toleranci  $\pm 0,15$  °C při teplotě 0°C.

Termočlánek typu K (NiCr-Ni) umožňuje měřit teploty v rozsahu od -200 do +1250°C. Přesnost měření použitých termočláneků je 0,4 %. Termočlánek typu K se používá pro měření teplot výfukových plynů v různých místech výfukového systému. Ostatní teploty se měří snímačem teploty Pt100. Ten má také vyšší citlivost díky menšímu rozsahu teplot.



Obr. 3.9 Snímač teploty Pt.



Obr. 3.10 Termočlánek typu K

Naměřené hodnoty všech tlaků reprezentují statickou složku tlaku. Statický tlak je v celém průtočném průřezu stejný. Kinetická a dynamická složka tlaku se zanedbává. Znamená to tedy, že se nezahrnuje vliv rychlosti proudění a ani viskozita proudící tekutiny jako při měření kinetického tlaku. Zanedbává se také stlačitelnost tekutiny, kterou zohledňuje dynamický tlak.

Pro měření celkového tlaku je technicky náročnější, ale ne tolik efektivní. Pro praktické použití dostačuje měření jen statické složky tlaku. Celkový tlak se pak určí podle vztahu:

$$p_c = p_s + p_d \quad (3.1) [11]$$

$$p_c = p_s + (s \cdot p_k)$$

$$p_c = p_s + \left( s \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \right)$$

kde je:

$p_c$  – celkový tlak

$p_s$  – statický tlak

$p_d$  – dynamický tlak

$p_k$  – kinetický tlak

$s$  – vliv stlačitelnosti tekutiny

$\rho$  – hustota tekutiny

$w$  – rychlost proudící tekutiny

Pro nezkreslené výsledky statického tlaku je nutné, aby tlak v místě měření byl ustálený (bez pulsací). Dosáhneme toho spojením místa měření tlaku a snímače hadičkou dostatečné délky (minimálně 1 metr) a úzkého průměru. Hodnotu tlaku ovlivňuje také velikost průřezu v místě měření. Pro opakovatelnost měření je tedy nutné volit stejná místa měření tlaku.

Statické měření tlaků je uskutečňováno pomocí piezoelektrických tlakoměrů s CAN komunikací. Přesnost měření tlaku je 0,15 % v rozsahu teplot 0 °C až 60 °C. Což je zároveň i pracovní teplota pro měření tlaku. Frekvence měření je od 5 Hz do 200 Hz. Měřicí rozsah je -1 až +6 bar [9]. Takto malý rozsah zajišťuje vysokou citlivost měření.

Veškeré naměřené hodnoty tlaků z ovládacího programu provozní místnosti jsou uvedeny v relativních hodnotách. Pro převedení na absolutní hodnoty je potřeba přičíst složku atmosférického tlaku, který byl také zaznamenáván.

### 3.1.8 Měření teploty a vlhkosti okolí

Teplota a vlhkost v provozní místnosti se měří samostatným zařízením. To je schopno měřit relativní vlhkost v rozsahu 0 až 100 % a teplotu od -40 °C až do 60 °C [9].





Obr. 3.9 Zařízení pro měření relativní vlhkosti a teploty okolí [9]

### 3.2 Sběr dat

Měřená data byla zaznamenávána pomocí záznamového softwaru ovládacího pultu provozní místnosti a dále pomocí diagnostického rozhraní VCDS. Což je software sloužící k sériové diagnostice vozidel koncernu Volkswagen a motorů vozidel ostatních značek plnící podmínky EOBD. Program umožňuje mimo jiných funkcí také nahrávat provozní data ze snímačů motoru, čehož jsem využil.

Stěžejní jsou data z ovládacího programu provozní místnosti. Použil jsem je pro vyhodnocení a stanovení různých závislostí zejména pro vysokou přesnost měření a rozsah měřících kanálů. Díky přesnosti měření jsem také použil do výpočtů jako vstupní hodnotu spotřebu paliva. Data z diagnostického programu jsem použil jen jako doplňkové měření, protože mi nejsou známy třídy přesností jednotlivých snímačů a nelze proto stanovit kompletní chyby měření. Nicméně zejména možnosti měření množství nasávaného vzduchu do motoru jakožto veličiny zohledňující parametry nasávaného vzduchu jsem využil a to i bez možnosti komplexního vyhodnocení chyb měření. A aritmetický průměr těchto hodnot jsem použil pro porovnání teoretických výpočtů množství nasávaného vzduchu.

#### 3.2.1 Data z VCDS

Pro měření byla použita verze programu SVO 10. 6.1 ve verzi dat 20100310. Program nahrává data narozdíl od ovládacího programu jen kontinuálně. Frekvenci nahrávání dat nelze předvolit. Je daná počtem nahrávaných kanálů, kterých může být maximálně 12. S rostoucím počtem kanálů klesá frekvence nahrávání dat jednotlivých kanálů, protože kanály jsou nahrávány postupně. Interval mezi nahrávanými kanály je 0,2 s.



Př.: Nahráváme-li čtyři kanály, tak kanál 1 se nahraje v čase 0,2 s, kanál 2 v čase 0,4 s, kanál 3 v čase 0,6 s, kanál 4 v čase 0,8 s a další záznam z kanálu 1 v čase 1 s . Frekvence ukládání záznamu je v tomto případě tedy 1,25 Hz. Je také zřejmé, že kanály nejsou nahrávány ve stejný čas, ale s určitým odstupem. Nicméně pro sledování pomalých jevů lze tenhle princip měření využívat. Při sledování rychlých a sporadických jevů je použitelný méně nebo vůbec.

Já jsem program použil jen jako doplňkové měření zejména kvůli možnosti měření množství nasávaného vzduchu. Nahrával jsem 9 kanálů. Nahrávací frekvence byla tedy 0,55 Hz. Dále jsem musel z důvodu kontinuálního nahrávání programu VCDS a manuálního nahrávání ovládacího programu vhodně přiřadit data k sobě a to podle teploty nasávaného vzduchu, kterou jsem nahrával oběma zařízeními.

Nahrávané veličiny programem VCDS:

|            |   |                          |
|------------|---|--------------------------|
| $n_{mV}$   | otáčky klikového hřídele motoru                         | $[\text{min}^{-1}]$      |
| $t_{1mV}$  | teplota nasávaného vzduchu do motoru za škrtící klapkou | $[\text{°C}]$            |
| $m_{1vV}$  | hmotnost nasávaného vzduchu do motoru                   | $[\text{min}^{-1}]$      |
| $M_{pV}$   | spotřeba paliva   | $[\text{mg.zdvih}^{-1}]$ |
| $p_{prV}$  | tlak paliva v zásobníku (v railu)                       | $[\text{bar}]$           |
| $t_{oV}$   | teplota okolí   | $[\text{°C}]$            |
| $p_{atmV}$ | tlak okolí  | $[\text{bar}]$           |
| $t_{pvV}$  | teplota paliva na vstupu do vysokotlakého čerpadla      | $[\text{°C}]$            |
| $p_{1mV}$  | plnicí tlak nasávaného vzduchu do motoru                | $[\text{bar}]$           |

Velké V v indexu označuje zdroj záznamu (VCDS).

### 3.2.2 Data z ovládacího programu

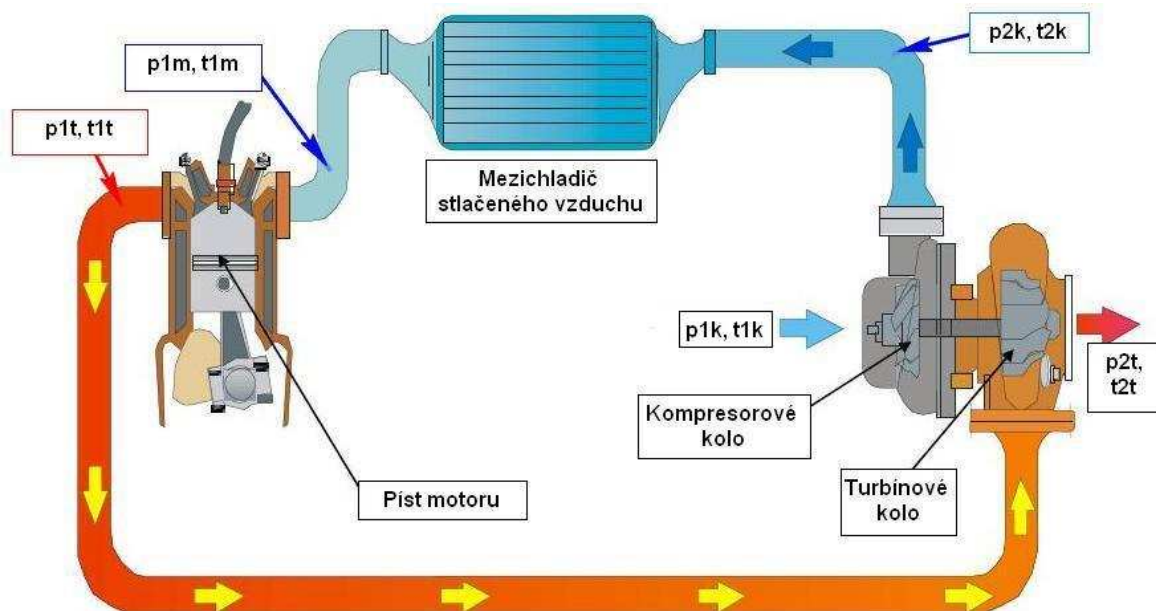
Nahrávání dat je nedílná funkce ovládacího programu provozní místnosti. Program dovoluje nahrávat data jak automaticky s předvolenou frekvencí (až 200 Hz) tak manuálně. Já jsem zvolil manuální nahrávání pro lepší přehlednost ve výsledcích. Z kontinuálního nahrávání bych měl mnoho nepoužitelných dat i z přechodů mezi požadovanými teplotami plnicího vzduchu. V každém kroku jsem provedl 5 měření. Při každém měření program

vypočítá aritmetický průměr z krátkého záznamu, jehož délku lze navolit. Zvolil jsem ji 10 sekund.

Nahrávané veličiny ovládacím programem:

|           |  |                           |
|-----------|--|---------------------------|
| $\alpha$  | poloha pedálu plynu  | [%]                       |
| $M_p$     | hodinová spotřeba paliva   | [kg.h <sup>-1</sup> ]     |
| $m_{zv}$  | spotřeba paliva na zdvih<br>(jedná se o přepočet z hodinové měrné spotřeby paliva)   | [mg.zdvih <sup>-1</sup> ] |
| $P_e$     | efektivní výkon motoru   | [kW]                      |
| $M_e$     | točivý moment motoru   | [N.m]                     |
| $p_{1k}$  | tlak vzduchu před kompresorovou skříní<br>(měřeno v sání za vzduchovým filtrem)  | [bar]                     |
| $p_{2k}$  | tlak vzduchu za kompresorovou skříní<br>(měřeno mezi výstupem z kompresorové skříně a mezichladičem)   | [bar]                     |
| $p_{1m}$  | tlak plnicího vzduchu za škrtící klapkou – před vstupem do motoru  | [bar]                     |
| $p_{1t}$  | tlak výfukových plynů před vstupem do turbínové skříně<br>(měřeno těsně před vstupem do turbínové skříně ve výfukových svodech, tak, aby se zohlednil vliv všech válců motoru) | [bar]                     |
| $p_{2t}$  | tlak výfukových plynů ve výstupu z turbínové skříně<br>(měřeno ve výfuku, nejdále 30 cm od výstupu z turbínové skříně)   | [bar]                     |
| $p_{ovl}$ | tlak v ovladači regulace turbodmychadla (ovladač VNT mechanismu)<br>(měření tlaku v podtlakové dóze nastavovače lopatek)   | [bar]                     |
| $p_{atm}$ | tlak okolí   | [bar]                     |
| $n_m$     | otáčky klikového hřídele   | [min <sup>-1</sup> ]      |
| $t_o$     | teplota okolí – teplota v provozní místnosti měřená u stropu   | [°C]                      |
| $t_{1k}$  | teplota vzduchu za kompresorovou skříní<br>(měřeno v sání za vzduchovým filtrem)   | [°C]                      |
| $t_{2k}$  | teplota vzduchu za kompresorovou skříní<br>(měřeno mezi výstupem z kompresorové skříně a mezichladičem stejné místo jako $p_{2k}$ )  | [°C]                      |
| $t_{1m}$  | teplota plnicího vzduchu za škrtící klapkou – před vstupem do motoru   | [°C]                      |
| $t_{1t}$  | teplota výfukových plynů před vstupem do turbínové skříně<br>(stejně měřící místo jako při měření $p_{1t}$ )   | [°C]                      |
| $t_{2t}$  | teplota výfukových plynů ve výstupu z turbínové skříně<br>(stejně měřící místo jako při měření $p_{2t}$ )  | [°C]                      |

|           |  |      |
|-----------|--|------|
| $p_{hi}$  | relativní vlhkost okolí<br>(stejně místo a stejné měřicí zařízení jako pro teplotu okolí $t_o$ )           | [%]  |
| $t_{chk}$ | teplota chladicí kapaliny motoru<br>(měřeno na výstupu z motoru resp. před vstupem do chladicího zařízení) | [°C] |



Obr. 3.10 Rozmístění měření tlaků a teplot [12]

### 3.3 Metodika měření

Postup měření jsem navrhl tak, aby bylo měření za vstupních podmínek opakovatelné. Souhrn těchto podmínek se vztahuje k technickému stavu motoru, technickému vybavení pro provoz a měření veličin (vybavení popsané v předchozích podkapitolách) a zejména teploty okolí v provozní místnosti a teploty venkovní. Venkovní teplota je totiž téměř shodná s teplotou chladicí vody, která se používá k chlazení nasávaného vzduchu v zařízení popsaného v kapitole 3.1.6. Nejnižší teplota nasávaného vzduchu, při které jsem prováděl měření byla 20 °C. V letních měsících může být venkovní teplota v provozní místnosti vyšší než 35 °C. V takovém případě, vzhledem k platnosti II. termodynamického zákona nelze dosáhnout při tomto typu chlazení nižší teploty než je teplota okolí.

Venkovní teplota pro opakování měření při teplotách nasávaného vzduchu 30 °C a méně musí být pod 20 °C. Platí to při použití konvenčního chladicího zařízení. Pokud bude při zkoušce použito jiné zařízení (na principu klimatizace), lze zkoušku opakovat kdykoli. Mezi další vstupní podmínky patří teplota paliva na vstupu do motoru, kterou jsem zvolil na 30 °C a průchozí výfuk. Teplota paliva má vliv na tvorbu směsi zejména na její rychlost. S nižší teplotou klesá rychlost promísení paliva se vzduchem a roste prodleva vznícení. Teplota paliva také ovlivňuje v menší míře množství přivedeného tepla do oběhu vstříknutím paliva ke konci kompresního zdvihu.

Průchozí výfuk znamená, že není použit katalyzátor ani filtr pevných částic ani jiného škrcení ve výfuku, které by ovlivňovalo tlak za turbodmychadlem. Je to patrné z výsledků. Hodnota tlaku za turbodmychadlem se po celou dobu měření pohybovala s mírnými odchylkami kolem hodnot atmosférického tlaku.

#### Postup měření:

1. Vizuální kontrola motoru, případné úniky provozních kapalin, poškození elektroinstalace, kontrola hladiny motorového oleje. Motor musí být v sériovém provedení bez úprav. Dodržet hodnoty uvedené v úvodu kapitoly.
2. Kontrola funkčnosti měřících kanálů ovládacího SW. Kanál je nefunkční pokud není zobrazena číselná hodnota. Může to být způsobeno špatným kontaktem nebo nefunkčností snímače.
3. Vyčtení paměti závad pomocí diagnostického SW VCDS. V paměti nesmí být závady způsobující nesprávný (nouzový režim) chod motoru. Některá hlášení v paměti závad mohou být nahodilá a po jejich smazání motor pracuje správně. Jiná hlášení jsou důsledkem trvalých závad. Ty musí být pro správný chod odstraněny a chybová hlášení následně smazána. Někdy se totiž stane, že i po odstranění závad motor pracuje v nouzovém režimu v důsledku nesmazání chyb.
4. Start motoru a jeho postupný ohřev. Teplota chladicí kapaliny musí být mezi 85 a 90 °C. Teplota motorového oleje před začátkem měření musí být minimálně 80 °C.
5. Během zahřívání předvolíme ve VCDS i v ovládacím SW provozní místnosti nahrávané kanály (viz. kapitola 3.2.1 a 3.2.2).
6. Po dosažení požadovaných teplot provozních kapalin změříme vnější rychlostní charakteristiku motoru (výkonová charakteristika motoru) při  $t_{lm} = 40\text{ °C}$ . Toto kontrolní měření slouží k ověření správného chodu a technického stavu motoru.

7. Měření vnější rychlostní charakteristiky ukončíme porovnáním naměřených hodnot z referenčními hodnotami daného motoru. Ty jsou většinou součástí dokumentace motoru nebo pocházejí z měření po zaběhnutí motoru.
8. Uvedeme motor na dvě minuty do volnoběžných otáček.
9. Předvolíme první měřicí režim, tj. otáčky motoru  $1750 \text{ min}^{-1}$  a poloviční zatížení motoru respektive nastavení dráhy pedálu plynu do střední polohy (50 % plyn).
10. Teplotu nasávaného vzduchu nastavíme na  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po jejím dosažení necháme dvě minuty ustálit.
11. Zapneme nahrávání dat pomocí VCDS, provedeme a uložíme měření v ovládacím SW. Přerušíme nahrávání dat VCDS.
12. Otáčky motoru zvýšíme na  $2500 \text{ min}^{-1}$ . Teplotu nasávaného vzduchu  $t_{1m} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  necháme po zvýšení otáček motoru ustálit dvě minuty .
13. Zapneme nahrávání dat pomocí VCDS, provedeme a uložíme měření v ovládacím SW. Přerušíme nahrávání dat VCDS.
14. Otáčky motoru zvýšíme na  $3500 \text{ min}^{-1}$ . Teplotu nasávaného vzduchu  $t_{1m} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  necháme po zvýšení otáček motoru ustálit dvě minuty .
15. Zapneme nahrávání dat pomocí VCDS, provedeme a uložíme měření v ovládacím SW. Přerušíme nahrávání dat VCDS.
16. Otáčky motoru navolíme na  $1750 \text{ min}^{-1}$ . Teplotu nasávaného vzduchu  $t_{1m}$  nastavíme na  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Po jejím dosažení necháme dvě minuty ustálit.
17. Zapneme nahrávání dat pomocí VCDS, provedeme a uložíme měření v ovládacím SW. Přerušíme nahrávání dat VCDS.
18. Otáčky motoru zvýšíme na  $2500 \text{ min}^{-1}$ . Teplotu nasávaného vzduchu  $t_{1m} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  necháme po zvýšení otáček motoru ustálit dvě minuty .
19. Zapneme nahrávání dat pomocí VCDS, provedeme a uložíme měření v ovládacím SW. Přerušíme nahrávání dat VCDS.
20. Otáčky motoru zvýšíme na  $3500 \text{ min}^{-1}$ . Teplotu nasávaného vzduchu  $t_{1m} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  necháme po zvýšení otáček motoru ustálit dvě minuty .
21. Zapneme nahrávání dat pomocí VCDS, provedeme a uložíme měření v ovládacím SW. Přerušíme nahrávání dat VCDS. Tím máme ukončeny dva měřicí kroky.
22. Dále pokračujeme ve výše zmíněném postupu s teplotami nasávaného vzduchu  $t_{1m} = 40, 50, 60, 70$  a  $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Opakujeme tedy postup z předchozích bodů s následnými teplotami nasávaného vzduchu. Zatížení motoru neměníme (50 % plyn).
23. Poslední měřicí režim je  $3500 \text{ min}^{-1}$ , 50 % plyn a  $t_{1m} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$  .
24. Poté motor uvedeme na dvě minuty do volnoběžných otáček.

25. Tím je ukončen jeden měřicí cyklus a výsledkem je soubor naměřených dat o sedmi řádcích a x sloupcích (podle počtu zvolených měřících kanálů) uložený v paměti ovládacího programu.
26. Měřicí cyklus z bodů 9 až 24 nadále opakujeme. Celkem takto provedeme 5 měřících cyklů při poloze plynu na 50 % a 5 při poloze plynu na 100%.
27. Po posledním cyklu musíme mít v paměti uložen soubor o 210 řádcích a x sloupcích.
28. Zpracujeme nahraná data. Převédeme je z formátu txt do formátu xls. Vytvoříme soubory dat podle teplot nasávaného vzduchu, otáček a zatížení motoru, tak aby bylo možné provést jednoduché vyhodnocení.
29. Stanovíme chyby měření a následné průměrné hodnoty použijeme ke srovnávacím výpočtům.

### 3.4 Metodika vyhodnocení

Žádné měřicí přístroje nejsou absolutně přesné. Což je jeden z důvodů, proč je potřeba u naměřených dat vyjádřit nejistoty měření. Nejistota měření je parametr přiřazený k výsledku měření, charakterizující rozptyl hodnot, které lze důvodně přiřazovat k měřené veličině. Jedná se o parametr charakterizující rozptyl hodnot okolo výsledné naměřené hodnoty, v němž s jistou pravděpodobností je hodnota pravá. Standardní nejistotou se označuje nejistota daná směrodatnou odchylkou veličiny, pro niž je nejistota udávána. Nejistoty měření obsahují obvykle řadu složek vyplývajících z různých zdrojů nejistot.[13]

Dle působení se chyby (nejistoty) měření dělí na:

- systematické chyby, které za stálých podmínek jsou stálé, lze je zmenšit pomocí korekcí, kalibrací a kompenzací, ne však úplně.
- náhodné chyby, které nelze vyloučit, protože se projevují zcela nahodile a jsou nepředvídatelné. Mění se u nich jak znaménko tak velikost. Lze je určit statistickými metodami s opakovaným měřením. Výsledkem je aritmetický průměr naměřených hodnot. Chyba je pak vyjádřena buď jako směrodatná odchylka měřeného souboru nebo jako směrodatná odchylka aritmetického průměru, což jsem použil já ve svém hodnocení.
- chyby hrubé, které zcela zhodnocují celý experiment. Poznáme je tak, že hodnoty zcela vybočují ze souboru ostatních hodnot. Během měření jsem se

s ní nesetkal, protože je lze omezit správným postupem měření, dodržováním podmínek měření a pozorným přístupem při měření. [14]

Dle zdroje se chyby dělí na:

- chyby přístroje, ty jsou dané zejména třídou přesnosti a měřícím rozsahem přístroje. Menší rozsah a vyšší třída přesnosti snižuje tuto chybu.
- chyby metody, každá metoda vkládá do měření určitou chybu měření, pokud ale při měření stanovenou metodu dodržujeme, jsou tyto chyby stále stejné a hodnoty měření srovnatelné (měření je opakovatelné). Tyto chyby můžeme do experimentu zanést při nedodržení předepsaných míst pro měření teplot případně průtočného průřezu pro měření tlaků apod.
- chyby pozorování, týkají se zejména odečtu hodnot z analogových stupnic, poněvadž jsou dány nedokonalostí smyslů a nepozorností obsluhy. Většina analogových stupnic má stanovenou chybu odečtu. U digitální měřicí techniky tato chyba není tak závažná. Do výsledku vstupuje spíše chyba daná vzorkovací frekvencí měřené veličiny.
- chyby vyhodnocení resp. výpočtové chyby, jsou dány systémem zpracování dat a také použitím linearizace, interpolace, extrapolace, zaokrouhlováním apod. [14]

Nejistoty měření se podle způsobu vyhodnocení dělí do skupin :

- standardní nejistota typu A označovaná symbolem  $u_A$
- standardní nejistota typu B označovaná symbolem  $u_B$
- kombinovaná standardní nejistota označovaná symbolem  $u_C$  [14]

**Standardní nejistota typu A** – stanoví se statistickým zpracováním naměřených hodnot. Nejprve je potřeba určit bodový odhad měřené veličiny což je aritmetický průměr měřené veličiny.

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3.2)[13]$$

$\overline{X}$  aritmetický průměr hodnoty X

$X_i$  i-tá hodnota

n Při každé zvolené teplotě nasávaného vzduchu jsem provedl 5 kontrolních měření.

Standardní nejistota typu A  $u_A(X)$  k odhadu  $\bar{X}$  je pak dána výběrovou směrodatnou odchylkou aritmetického průměru podle vztahu :

$$u_A(X) = \sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma(x_i)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (3.3)[15]$$

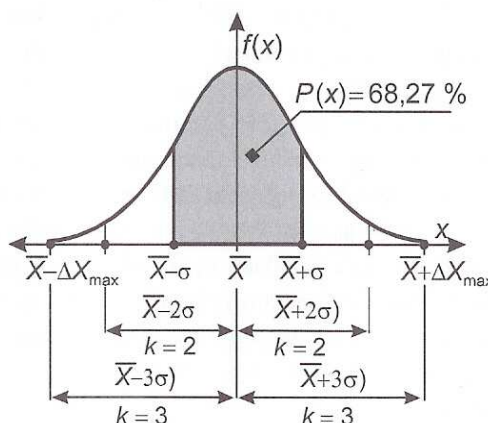
kde  $\sigma(x_i)$  je směrodatná odchylka měřeného souboru daná vztahem

$$\sigma(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad (3.4)[13]$$

$u_A(X)$  standardní nejistota typu A

$\sigma(\bar{X})$  rozptyl aritmetického průměru

Statistické rozdělení odchylek od výběrového průměru, tj. rozptyl hodnot, odpovídá rozdělení normálnímu (Gaussovu).



Obr. 3.5.1 Hustota normálního rozdělení pravděpodobnosti [13]

Pro vyhodnocování dat jsem zvolil součinitel  $k = 1$ , tedy pravděpodobnost, že odchylka od aritmetického průměru  $\bar{X}$  nabude hodnoty v intervalu  $\pm \sigma$ , neboli pro interval  $\bar{X} \pm \sigma$ , plocha vymezuje pravděpodobnost 68,27%.



Pro výpočet dolní a horní odchylky pak budou platit vztahy:

$$\text{Dolní odchylka} \quad \bar{X} - u_A(X) \quad (3.5)[13]$$

$$\text{Horní odchylka} \quad \bar{X} + u_A(X) \quad (3.6)[13]$$

**Standardní nejistota typu B** – jedná se o nejistotu přístroje resp. měřicího zařízení, termočlátku apod. Je daná nejistotou výsledku přímého měření veličiny mající zanedbatelnou základní nejistotu. Základní nejistota měřené veličiny je nejmenší nejistota, která může být udána při popisu měřené veličiny.

Třída přesnosti přístroje je kategorie měřících přístrojů splňujících soubor specifikací týkajících se nejistoty. Třída nejistoty vždy specifikuje mezní hodnotu nejistoty přístroje za specifikovaných podmínek. Standardní nejistota typu B je dána vztahem[13] :

$$u_B(X) = \frac{TP}{100} M \frac{1}{\Theta} \quad (3.7)[15]$$

$u_B(X)$  standardní nejistota typu B

TP třída přesnosti. Třídy přesnosti jsou 0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 1,5 - 2,5 - 5.

M největší hodnota měřicího rozsahu

$\Theta$  hodnota zvoleného pravděpodobnostního rozdělení.

Pro rovnoměrné rozdělení (základní výstupní kontrola výrobce)  $\Theta = \sqrt{3}$

Pro trojúhelníkové rozdělení (vyspělé technologie výrobce)  $\Theta = \sqrt{6}$

Pro normální rozdělení (přesné přístroje)  $\Theta = 2$

Pro normální rozdělení (měřidla s velmi vysokou přesností, etalony)  $\Theta = 3$

**Kombinovaná standardní nejistota** – skládá se z obou základních typů nejistot A a B a je dána vztahem:

$$u_c(X) = \sqrt{u_A^2(X) + u_B^2(X)} \quad (3.8)[13]$$

$u_c(X)$  kombinovaná standardní nejistota

$u_A(X)$  standardní nejistota typu A

$u_B(X)$  standardní nejistota typu B

Kombinovaná standardní nejistota nám udává, v jakém rozptylu od aritmetického průměru měřené hodnoty se naměřená data nacházejí. [13]

### **Rozšířená nejistota měření**

Označená  $U(x)$  je definována jako součin kombinované standardní nejistoty  $u_c$  a koeficientu rozšíření  $k_r$ , tedy vztahem (3.9) dle [15]

$$U(x) = k_r \cdot u_c(x) \quad (3.9) [15]$$

kde  $U$  je rozšířená nejistota,  $k_r$  koeficient rozšíření,  $u_c$  kombinovaná standardní nejistota a  $x$  měřená veličina. S rozšířenou nejistotou je nutno vždy uvést číselnou hodnotu použitého koeficientu rozšíření  $k_r$ . Jeho hodnota bývá nejčastěji 2, popř. leží v intervalu  $\langle 2, 3 \rangle$

## 4 Experimentální měření

Experimentální měření podle mnou navržené metodiky je velice náročné na technické vybavení (viz. kapitola 3.1), ale i časově díky navržené metodice měření. Pro opakovatelnost měření a objektivnost naměřených dat je však nutné tuto metodiku bezpodmínečně dodržet.

Vlastnímu experimentálnímu měření předchází měření vnější rychlostní charakteristiky motoru, které slouží k ověření technického stavu motoru.

### 4.1 Motor použitý k měření

K měření byl k dispozici motor 2.0 TDI s produkce koncernu Volkswagen s kódovým označením CGL. Tento motor využívá koncern jako pohonnou jednotku pro vozidla nižší střední třídy, kde tvoří vrchol nabídky, pro vozidla střední, vyšší střední třídy, MPV a SUV kategorie, kde tvoří střed nabídky. Konkrétně zmíněný motor s kódovým označením CGL je určen pro vůz AUDI Q5 čili pro podélnou zástavbu motoru vpředu.

Parametry motoru [16] :

- \* řadový čtyřválec o objemu válců  $1968 \text{ cm}^3$ , vrtání válce je 81 mm a zdvih pístu 95,5 mm. Jedná se tedy o podčtvercový resp. dlouhozdvihový motor.
- \* kompresní poměr 16,5:1
- \* vybaven výfukovým turbodmychadlem s pneumatickým ovládáním VNT mechanismu, nastavovač lopatek se snímačem polohy, mezichladič stlačeného vzduchu (vzduch-vzduch)
- \* palivový systém Common Rail s maximálním vstřikovacím tlakem 1850 bar, přímý vstřik paliva do válce s elektromagnetickými vstřikovači (dříve vyrobené motory mohou být vybaveny piezovstřikovači), motormanagement Bosch EDC 17
- \* recirkulace výfukových plynů (EGR)s vodním chladičem, oxidační katalyzátor, filtr pevných částic (DPF)
- \* blok válců odlit z šedé litiny, kovaná kliková hřídel uložená v pěti hlavních ložiscích, dva vyvažovací hřídele otáčející se opačnými a polovičními otáčkami než kliková hřídel

- \* hlava válců ze slitiny hliníku, čtyři ventily na válec, samočinné vymezování ventilové vůle, rozvodový mechanismus DOHC, pohon rozvodového mechanismu přes ozubený řemen umístěný v přední části.

Provozní parametry motoru:

- \* maximální teplota motorového oleje 130°C
- \* maximální teplota na výstupu z motoru 98°C
- \* maximální teplota výfukových plynů 830°C
- \* maximální profuk z klikové skříně 60 l.min<sup>-1</sup>
- \* maximální plnicí tlak 2640 mbar
- \* výkon motoru 122kW (minimální) -130kW(maximální) při 4200 min<sup>-1</sup>
- \* podávací tlak paliva 4 – 6 bar
- \* volnoběžné otáčky motoru 860 min<sup>-1</sup>

Vnější rychlostní charakteristika motoru při teplotě okolí 18°C a tlaku okolí 0,978 MPa, teplotě nasávaného vzduchu 40°C a chladicí kapaliny v okruhu 88°C je zobrazena na obr. 2.5. Největší naměřený výkon je 133 kW a točivý moment 370 N.m.

## 4.2 Vnější rychlostní charakteristika

Vnější rychlostní (otáčková) charakteristika motoru zobrazuje závislost točivého momentu motoru  $M_e$  a efektivního výkonu motoru  $P_e$  případně měrné spotřeby paliva  $m_{pe}$  na otáčkách motoru. Měření probíhá při plném zatížení motoru (100%) resp. při maximální dodávce paliva. Kromě absolutních hodnot dosažených v jednotlivých bodech, které slouží pro porovnávání technického stavu motoru během jeho provozu lze z rychlostní charakteristiky určit parametry motoru, ze kterých se usuzují vlastnosti motoru [17]. Mezi tyto vlastnosti patří:

### Momentová pružnost

$$e_M = \frac{M_{\max}}{M(P_{\max})} = \frac{370}{300} = 1,23 \quad (4.1)[17]$$

$M_{\max}$  – maximální točivý moment motoru

$M(P_{\max})$  – točivý moment při maximálním výkonu motoru

### Otáčková pružnost

$$e_n = \frac{n(P_{\max})}{n(M_{\max})} = \frac{4250}{2250} = 1,89 \quad (4.2)[17]$$

$n(P_{\max})$  – otáčky motoru při nejvyšším výkonu motoru

$n(M_{\max})$  – otáčky motoru při nejvyšším točivém momentu motoru

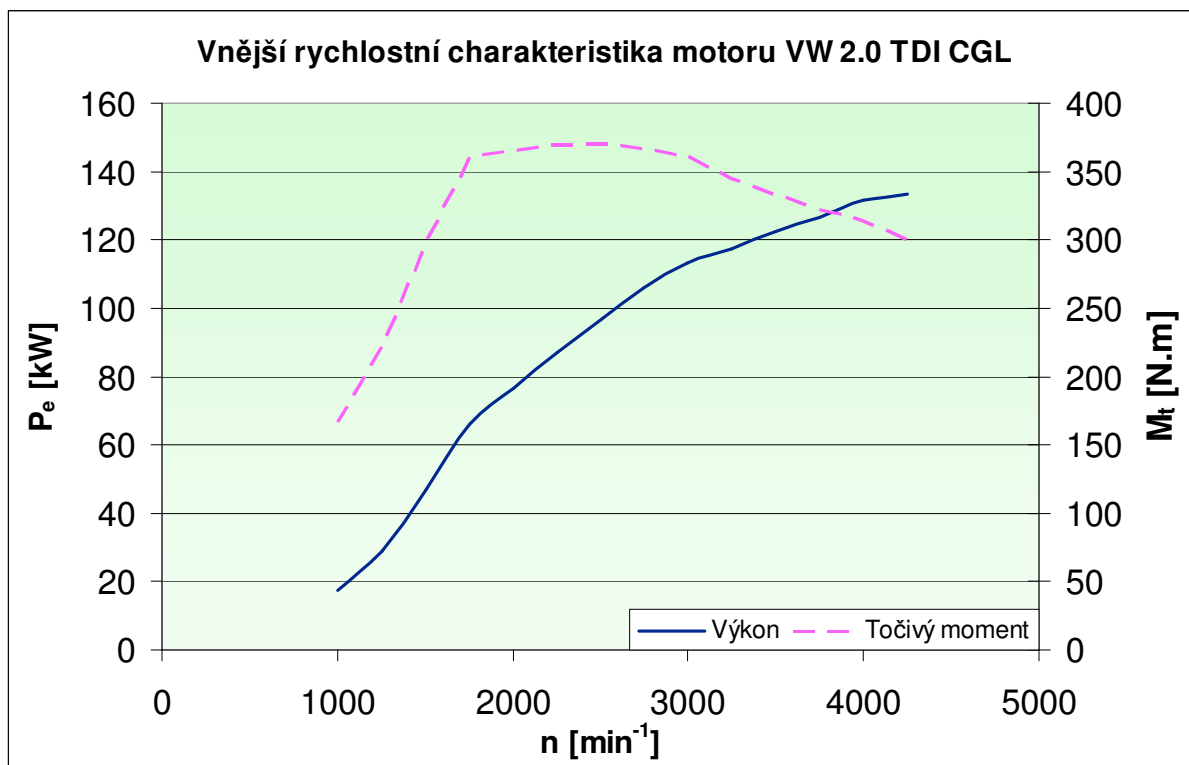
### Celková pružnost motoru

$$\begin{aligned} e_m &= e_M \cdot e_n \\ e_m &= 1,23 \cdot 1,89 \\ e_m &= 2,33 \end{aligned} \quad (4.3)[17]$$

Celková pružnost se u vznětových motorů pohybuje mezi 1,34 – 2,7. Podle této hodnoty se pak motory klasifikují na nepružné, málo pružné, normální, velmi pružné a vysoce pružné. Pružnost motoru udává schopnost motoru pracovat co v největším otáčkovém rozsahu na stabilní větvi momentové charakteristiky. Ta je ohraničena body  $n(M_{\max})$  a  $n_{\max}$  a je charakteristická tím, že při poklesu otáček roste točivý moment.[17]

Maximální otáčky motoru jsou  $5000 \text{ min}^{-1}$ . Na obrázku 4.1 nejsou hodnoty točivého momentu a výkonu při těchto otáčkách zobrazeny, protože od otáček vyšších než  $4250 \text{ min}^{-1}$  už výkon a točivý moment klesá a není efektivní v těchto otáčkách motor provozovat.

Z výsledku celkové pružnosti motoru  $e_m = 2,33$  lze klasifikovat, že se jedná o velmi pružný motor.



Obr. 4.1 Vnější rychlostní charakteristika.

### 4.3 Zkušební měření

Zkušební měření probíhalo podle metodiky popsané v kapitole 3.3 s použitím zařízení popsaného v kapitole 3.1. Před vlastním měřením jsem provedl identifikaci motoru resp. řídicí jednotky motoru diagnostickým programem VCDS a výpis paměti závad.

#### Výsledek výpisu identifikace:

Sobota, 27. Listopad, 2010, 23:17:58:21390  
 VCDS verze: SVO 10.6.1  
 Verze dat: 20100310

Adresa 01: Motor  
 Objednací číslo řídicí jednotky: 03L 906 018 DN  
 Systém a/nebo verze: DD5L5PADRX300 X11 Z948  
 Kódování: 00000000000000000000  
 Číslo dílny: WSC 00000  
 VCID: 79FDB71649AB

Rozšířená identifikace/FAZIT  
 Identifikace: BPG-810  
 Revize: 10X1110T  
 Datum: 12.03.09  
 Číslo výrobce: 1212  
 Číslo zkušebny: 0030

Stav Flash  
Programovací pokusy(aplikace): 0/0/0  
Úspěšné pokusy(aplikace): 0/0/0  
Datum Flashování: 00.00.00  
Ostatní  
Číslo Hardwaru: 03L 906 018 AC  
Název systému dílny: J623  
ASAM Dataset: EV\_ECM20TDI01103L906018DN  
Vydání ASAM Datasetu: 003002  
Info o vozidle  
Číslo podvozku:  
Kód motoru: CGL  
VCDS Info:  
Labely: nevybrány  
Readiness: Žádný skript není dostupný  
ROD: EV\_ECM20TDI01103L906018DN.rod

Z identifikačního výpisu je patrné datum měření, verze dat a verze programu. Není provedeno konkrétní kódování, což je zřejmé i z výpisu paměti závad. Kódování není provedeno, protože motor resp. řídící jednotka (ŘJ) není určena pro umístění do konkrétního vozidla. Případné kódování se provádí vždy až po montáži do vozidla. ŘJ není přeprogramovaná, což naznačuje stav Flash. ŘJ je tedy v produkčním stavu.

Výpis z paměti závad:

V paměti závad se nacházelo 6 závad. Z toho dvě odkazují na neprovedené kódování řídící jednotky. Další dvě závady jsou neznámého charakteru. To může být způsobeno nezapojením některého z konektorů kabeláže motoru. Pro provoz na zkušební stanici není totiž nutné provádět kompletní zapojení. Ostatní závady jsou již blíže identifikovatelné. Jedna se týká systému zpětného vedení spalín, protože ten byl záměrně odpojen a druhá nezapojeného čidla teploty oleje motoru.

Žádná z uložených záznamů v paměti řídící jednotky neměla vliv na správný chod motoru, což prokázalo i následné měření vnější rychlostní charakteristiky motoru viz. předchozí kapitola, ale i hodnota Readiness kódu. Tento kód určuje stav jednotlivých komponent, které ovlivňují spalování. Je to tedy soupis důležitých hodnot signalizující zda je všechno v pořádku či nikoli. Hodnota 0 znamená, že daný komponent je v pořádku, hodnota 1 znamená chybu. Význam jednotlivých míst v kódu je u všech ŘJ plnicí normu EOBD stejný a sice následující:

- 1 - zpětné vedení výfukových plynů
- 2 - vyhřívání lambda-sondy
- 3 - lambda-sonda

4 - klimatizace

5 - systém sekundárního přívodu vzduchu

6 - odvětrávání palivové nádrže

7 - vyhřívání katalyzátoru

8 – katalyzátor

V mnou provedeném výpisu paměti závad jsou všechny pozice v Readiness kódu nulové tj. vše bez závad.

Sobota, 27, Listopad, 2010, 23:16:19:21390

VCDS verze: SVO 10.6.1

Verze dat: 20100310

-----  
-----  
-----  
-----

                    Adresa 01: Motor                    Labely: nevybrány  
Objednací číslo řídicí jednotky: 03L 906 018 DN          HW: 03L 906 018 AC  
                    Systém a/nebo verze: DD5L5PADRX300 X11 Z948  
                                    Kódování: 00000000000000000000  
                                    Číslo dílny: WSC 00000 000 00000  
                    ASAM Dataset: EV\_ECM20TDI01103L906018DN 003002 (AU48)  
                                    VCID: 79FDB71649AB

6 závad nalezeno.

4807 - system zpetneho vedeni vyfuk.plynu - prutok prilis maly

          P0401 00 [237] - zkrat na kostru

                    info o závadě:

                            Stav závad: 00000001

                            Priorita závad: 2

                            Frekvence závad: 10

4635 - cidlo teploty oleje (G8): neverohodny signal

          P0196 00 [047] - preruseni

                    info o závadě:

                            Stav závad: 00000001

                            Priorita závad: 2

                            Frekvence závad: 1

10092 - Neznámý chybový kód

          P15A0 00 [047] - chyba v elektr. obvodu

                    info o závadě:

                            Stav závad: 00000001

                            Priorita závad: 2

                            Frekvence závad: 1

5162 - ROD - Neznámý chybový kód

                    info o závadě:

                            Stav závad: 00000001

                            Priorita závad: 2

                            Frekvence závad: 1

10529 - ridici jednotka motoru chybne kodovana

          P1612 00 [175] - horni mezni hodnota prekrocena

                    info o závadě:

                            Stav závad: 00000001

                            Priorita závad: 2

                            Frekvence závad: 1

                            Kilometry: 0 km

                            Datum: 2000.00.00



```

                                Čas: 00:00:00
4629 - Neznámý chybový kód
      P068A 00 [032] - zadne; nebo spatne zakladni nastaveni /
prizpusobeni
      info o závadě:
        Stav závad: 00000001
        Priorita závad: 2
        Frekvence závad: 7
        Kilometry: 0 km
        Datum: 2000.00.00
        Čas: 00:00:00
Readiness: 0000 0000
```

V průběhu experimentálního měření nenastal žádný problém a vše proběhlo podle zvolené metodiky měření. Nebylo potřeba ani provádět, žádné opravné měření, např. v důsledku hrubých chyb měření, závady na motoru nebo ostatním zařízení. Rovněž naměřené výsledky jsem zpracoval podle navržené metodiky.

## 5 Vyhodnocení měření a doporučení

Soubor dat z měření jsem z důvodu rozsahu zpracoval do příloh diplomové práce. Jsou tam uvedena jak data z ovládacího tak diagnostického programu VCDS. V jedné z následujících podkapitol jsem uvedl jen souhrn dat z ovládacího programu, doplněný o chyby měření. Data z programu VCDS jsem na chyby měření nevyhodnocoval. Zejména proto, že neznám třídy přesností a měřicí rozsahy jednotlivých snímačů motoru, ale také proto, že jsem tato data použil jako informativní. I přesto jsem je zahrnul pro grafické vyhodnocení závislosti na teplotě nasávaného vzduchu a pro srovnání s hodnotami vypočtenými.

### 5.1 Vyhodnocení naměřených hodnot točivého momentu motoru

Pro demonstrativní příklad vyhodnocení naměřených dat jsem zvolil hodnoty točivého momentu motoru a to z provozního režimu  $1750 \text{ min}^{-1}$ , maximálního zatížení motoru a teploty nasávaného vzduchu  $t_{lm} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Známé (vstupní) hodnoty

Naměřené hodnoty točivého momentu motoru:

$$X_1 = 353,2 \text{ N.m}$$

$$X_2 = 353,6 \text{ N.m}$$

$$X_3 = 352,6 \text{ N.m}$$

$$X_4 = 352,1 \text{ N.m}$$

$$X_5 = 352,8 \text{ N.m}$$

$$n = 5$$

$$TP = 0,2 \%$$

$$M = 400 \text{ N.m}$$

$$\Theta = 2$$

$$k_r = 2$$

#### Standardní nejistota typu A

Bodovým odhadem měřené veličiny je aritmetický průměr resp. střední hodnota všech měření.

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{353,2 + 353,6 + 352,6 + 352,1 + 352,8}{5} = \frac{1764,30}{5} = 352,86 \text{ N.m} \quad (3.2)[13]$$

Standardní nejistota typu A je pak dána výsledkem statistické analýzy:

$$u_A(X) = \sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma(x_i)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \quad (3.3)[15]$$

$$\sigma(\bar{X}) = \sqrt{\frac{(353,2 - 352,86)^2 + (353,6 - 352,86)^2 + (352,6 - 352,86)^2 + (352,1 - 352,86)^2 + (352,8 - 352,86)^2}{5 \cdot (5-1)}}$$

$$u_A(X) = \sigma(\bar{X}) = \underline{\underline{0,0328 \text{ N.m}}}$$

Nejistota měření se vždy zaokrouhluje na jednu maximálně dvě platné cifry směrem nahoru. Výsledek standardní nejistoty typu A je tedy  $u_A(X) = 0,04 \text{ N.m}$ . Při zvoleném součiniteli  $k = 1$  bude tedy dolní odchylka  $\bar{X} - u_A(X)$  rovna  $352,82 \text{ N.m}$  a horní odchylka  $\bar{X} + u_A(X)$   $352,9 \text{ N.m}$ .

### Standardní nejistota typu B

Vypočítá se podle vztahu (22), tedy:

$$u_B(X) = \frac{TP}{100} M \frac{1}{\Theta} = \frac{0,2}{100} \cdot 500 \cdot \frac{1}{2} = 0,5 \text{ N.m} \quad (3.7)[15]$$

### Kombinovaná standardní nejistota

Získáme ji dle vztahu (23)

$$\begin{aligned} u_c(X) &= \sqrt{u_A^2(X) + u_B^2(X)} \\ u_c(X) &= \sqrt{0,04^2 + 0,5^2} \\ u_c(X) &= 0,51 \text{ N.m} \end{aligned} \quad (3.8)[13]$$

### Rozšířená nejistota měření

$$\begin{aligned} U(x) &= k_r \cdot u_c(x) \\ U(x) &= 2 \cdot 0,51 \\ U(x) &= 1,02 \text{ N.m} \end{aligned} \quad (3.9)[15]$$

Výsledek měření z režimu  $1750 \text{ min}^{-1}$  a maximálního zatížení motoru a teplotě nasávaného vzduchu  $t_{1m} = 50 \text{ °C}$  můžeme tedy zapsat,  $M_e = 352,86 \pm 1,02 \text{ N.m}$ .

## 5.2 Vyhodnocení ostatních hodnot

Vyhodnocení ostatních naměřených hodnot z ovládacího programu jsem provedl pomocí Microsoft Excel 2003. Kompletní vyhodnocení je v příloze A. Zde je uveden jen souhrn nekompletních výsledných dat obsahující chyby měření. V souhrnu nejsou výchozí neměnné hodnoty pro daný měřicí cyklus (otáčky motoru, poloha pedálu plynu), hodnoty neměnné se v závislosti na teplotě nasávaného vzduchu (atmosférický tlak, vlhkost a teplota okolí v provozní místnosti), teplota chladicí kapaliny, kterou jsem zaznamenával jen pro doložení jedné z podmínek měření a poloha ovladače lopatek VNT mechanismu. Polohu lopatek jsem nevyhodnocoval na chyby měření, protože neznám třídu přesnosti snímače. Mění se polohu ovladače, ale také demonstruje změna podtlaku v dóze ovladače.

Tab. 5.1 Výsledná data včetně nejistot měření z režimu 1750 min<sup>-1</sup> a 50% plynu.

| $t_{1m}$   | $M_p$                 | $m_{zv}$                  | $P_e$    | $p_{1k}$    | $p_{2k}$ | $p_{1m}$ | $p_{1t}$ |
|------------|-----------------------|---------------------------|----------|-------------|----------|----------|----------|
| [°C]       | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [mg.zdvih <sup>-1</sup> ] | [kW]     | [mbar]      | [mbar]   | [mbar]   | [mbar]   |
| 20,2 ± 0,4 | 10,22±0,15            | 48,65±0,15                | 49,6±0,5 | 3±10        | 1177±11  | 1169±11  | 1638±30  |
| 30,3 ± 0,4 | 10,23±0,15            | 48,7±0,2                  | 49,3±0,5 | 3±11        | 1179±12  | 1170±3,1 | 1564±14  |
| 40,3 ± 0,4 | 10,26±0,15            | 48,86±0,15                | 49±0,5   | 4±11        | 1178±11  | 1170±11  | 1537±11  |
| 50,1 ± 0,4 | 10,24±0,15            | 48,77±0,15                | 48,7±0,5 | 4±11        | 1179±11  | 1172±11  | 1538±38  |
| 60,2 ± 0,4 | 10,24±0,15            | 48,77±0,15                | 48,2±0,5 | 4±11        | 1179±11  | 1171±11  | 1538±11  |
| 70,1 ± 0,4 | 10,23±0,15            | 48,7±0,2                  | 47,9±0,5 | 4±11        | 1178±11  | 1171±11  | 1537±17  |
| 80,1 ± 0,4 | 10,23±0,15            | 48,71±0,15                | 47,5±0,5 | 4±11        | 1178±11  | 1171±11  | 1531±17  |
| $t_{1m}$   | $p_{2t}$              | $p_{ovl}$                 | $t_{1k}$ | $t_{2k}$    | $t_{1t}$ | $t_{2t}$ | $M_e$    |
| [°C]       | [mbar]                | [mbar]                    | [°C]     | [°C]        | [°C]     | [°C]     | [Nm]     |
| 20,2 ± 0,4 | -12±11                | -480±11                   | 23±0,4   | 133,46±0,56 | 567±6    | 405±6    | 270±1    |
| 30,3 ± 0,4 | -10±11                | -483±11                   | 24,3±0,4 | 140,3±0,4   | 585±6    | 426±6    | 269±1    |
| 40,3 ± 0,4 | -10±11                | -485±11                   | 22,3±0,4 | 138,7±0,4   | 596±6    | 438±6    | 267,5±1  |
| 50,1 ± 0,4 | -10±11                | -500±11                   | 22,5±0,4 | 139,6±0,4   | 608±6    | 448±6    | 266±1    |
| 60,2 ± 0,4 | -10±11                | -491±11                   | 22,7±0,4 | 141,1±0,4   | 619±6    | 458±6    | 263±1    |
| 70,1 ± 0,4 | -10±11                | -497±11                   | 22,8±0,4 | 142,2±0,4   | 631±6    | 468±6    | 261,5±1  |
| 80,1 ± 0,4 | -10±11                | -493±11                   | 22,8±0,4 | 143,1±0,4   | 644±6    | 479,2±6  | 259±1    |

Tab. 5.2 Výsledná data včetně nejistot měření z režimu 2500 min<sup>-1</sup> a 50% plynu.

| $t_{1m}$   | $M_p$                 | $m_{zv}$                  | $P_e$    | $p_{1k}$ | $p_{2k}$ | $p_{1m}$ | $p_{1t}$ |
|------------|-----------------------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| [°C]       | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [mg.zdvih <sup>-1</sup> ] | [kW]     | [mbar]   | [mbar]   | [mbar]   | [mbar]   |
| 20,3 ± 0,4 | 13,34±0,15            | 44,48±0,15                | 66,1±0,5 | -9±11    | 1358±11  | 1344±11  | 1343±11  |
| 30,4 ± 0,4 | 13,35±0,15            | 44,51±0,15                | 65,6±0,5 | -8±11    | 1358±11  | 1344±11  | 1319±11  |
| 40,1 ± 0,4 | 13,42±0,15            | 44,73±0,15                | 65,5±0,5 | -7±11    | 1360±11  | 1345±11  | 1298±11  |
| 50,3 ± 0,4 | 13,42±0,15            | 44,51±0,15                | 65±0,5   | -6 ± 11  | 1360±11  | 1344±11  | 1270±11  |
| 60,5 ± 0,4 | 13,4±0,2              | 44,67±0,15                | 64,7±0,5 | -6±11    | 1361±11  | 1345±11  | 125±11   |
| 69,8 ± 0,4 | 13,39±0,15            | 44,63±0,15                | 64,4±0,5 | -5±11    | 1362±11  | 1345±11  | 1233±11  |
| 79,7 ± 0,4 | 13,39±0,15            | 44,63±0,15                | 64,1±0,5 | -5±11    | 1363±11  | 1346±11  | 1216±11  |

| $t_{1m}$       | $p_{2t}$     | $p_{ovl}$     | $t_{1k}$       | $t_{2k}$          | $t_{1t}$    | $t_{2t}$    | $M_e$         |
|----------------|--------------|---------------|----------------|-------------------|-------------|-------------|---------------|
| [°C]           | [mbar]       | [mbar]        | [°C]           | [°C]              | [°C]        | [°C]        | [Nm]          |
| $20,3 \pm 0,4$ | $-12 \pm 11$ | $-324 \pm 11$ | $22,3 \pm 0,4$ | $143,7 \pm 0,4$   | $535 \pm 6$ | $389 \pm 6$ | $252,5 \pm 1$ |
| $30,4 \pm 0,4$ | $-12 \pm 11$ | $-328 \pm 11$ | $22,3 \pm 0,4$ | $143,7 \pm 0,4$   | $547 \pm 6$ | $399 \pm 6$ | $251,3 \pm 1$ |
| $40,1 \pm 0,4$ | $-12 \pm 11$ | $-326 \pm 11$ | $23,1 \pm 0,4$ | $144,4 \pm 0,4$   | $558 \pm 6$ | $409 \pm 6$ | $250 \pm 1$   |
| $50,3 \pm 0,4$ | $-11 \pm 11$ | $-324 \pm 11$ | $23,5 \pm 0,4$ | $145 \pm 0,4$     | $574 \pm 6$ | $423 \pm 6$ | $248,4 \pm 1$ |
| $60,5 \pm 0,4$ | $-10 \pm 11$ | $-323 \pm 11$ | $23,3 \pm 0,4$ | $146,58 \pm 0,92$ | $584 \pm 6$ | $434 \pm 6$ | $247 \pm 1$   |
| $69,8 \pm 0,4$ | $-10 \pm 11$ | $-320 \pm 11$ | $23,5 \pm 0,4$ | $146,3 \pm 0,4$   | $596 \pm 6$ | $444 \pm 6$ | $246 \pm 1$   |
| $79,7 \pm 0,4$ | $-10 \pm 11$ | $-317 \pm 11$ | $23,6 \pm 0,4$ | $146,9 \pm 0,4$   | $607 \pm 6$ | $455 \pm 6$ | $245 \pm 1$   |

Tab. 5.3 Výsledná data včetně nejistot měření z režimu 3500 min<sup>-1</sup> a 50% plynu.

| $t_{1m}$         | $M_p$                 | $m_{zv}$                  | $P_e$          | $p_{1k}$     | $p_{2k}$      | $p_{1m}$      | $p_{1t}$      |
|------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| [°C]             | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [mg.zdvih <sup>-1</sup> ] | [kW]           | [mbar]       | [mbar]        | [mbar]        | [mbar]        |
| $19,8 \pm 0,4$   | $16,92 \pm 0,15$      | $40,29 \pm 0,15$          | $81 \pm 0,5$   | $-24 \pm 11$ | $1278 \pm 11$ | $1253 \pm 11$ | $1458 \pm 38$ |
| $30,2 \pm 0,4$   | $16,96 \pm 0,15$      | $40,38 \pm 0,15$          | $80,6 \pm 0,5$ | $-22 \pm 11$ | $1280 \pm 11$ | $1254 \pm 11$ | $1385 \pm 22$ |
| $40,4 \pm 0,4$   | $16,95 \pm 0,15$      | $44,37 \pm 0,15$          | $80,4 \pm 0,5$ | $-21 \pm 11$ | $1280 \pm 11$ | $1255 \pm 11$ | $1344 \pm 11$ |
| $50,09 \pm 0,41$ | $16,99 \pm 0,15$      | $44,46 \pm 0,15$          | $80,2 \pm 0,5$ | $-19 \pm 11$ | $1282 \pm 11$ | $1256 \pm 11$ | $1298 \pm 12$ |
| $60,1 \pm 0,4$   | $16,98 \pm 0,15$      | $44,43 \pm 0,15$          | $79,8 \pm 0,5$ | $-18 \pm 11$ | $1282 \pm 11$ | $1257 \pm 11$ | $1260 \pm 11$ |
| $69,9 \pm 0,4$   | $16,98 \pm 0,15$      | $44,44 \pm 0,15$          | $79,4 \pm 0,5$ | $-17 \pm 11$ | $1282 \pm 11$ | $1257 \pm 11$ | $1239 \pm 12$ |
| $80,1 \pm 0,4$   | $16,96 \pm 0,15$      | $44,37 \pm 0,15$          | $79 \pm 0,5$   | $-16 \pm 11$ | $1269 \pm 11$ | $1244 \pm 11$ | $1199 \pm 11$ |

| $t_{1m}$         | $p_{2t}$   | $p_{ovl}$     | $t_{1k}$       | $t_{2k}$        | $t_{1t}$          | $t_{2t}$          | $M_e$         |
|------------------|------------|---------------|----------------|-----------------|-------------------|-------------------|---------------|
| [°C]             | [mbar]     | [mbar]        | [°C]           | [°C]            | [°C]              | [°C]              | [Nm]          |
| $19,8 \pm 0,4$   | $6 \pm 11$ | $-212 \pm 11$ | $23,7 \pm 0,4$ | $140,9 \pm 0,4$ | $543,14 \pm 6,08$ | $405,88 \pm 6,03$ | $221 \pm 1$   |
| $30,2 \pm 0,4$   | $6 \pm 11$ | $-203 \pm 11$ | $23,5 \pm 0,4$ | $139,6 \pm 0,4$ | $559,29 \pm 6,01$ | $420 \pm 6$       | $220 \pm 1$   |
| $40,4 \pm 0,4$   | $6 \pm 11$ | $-195 \pm 11$ | $23,8 \pm 0,4$ | $139,2 \pm 0,4$ | $572,67 \pm 6,03$ | $434 \pm 6$       | $219 \pm 1$   |
| $50,09 \pm 0,41$ | $6 \pm 11$ | $-190 \pm 11$ | $23,9 \pm 0,4$ | $139,6 \pm 0,4$ | $585 \pm 6$       | $447 \pm 6$       | $218,7 \pm 1$ |
| $60,1 \pm 0,4$   | $6 \pm 11$ | $-188 \pm 11$ | $24,1 \pm 0,4$ | $138,2 \pm 0,4$ | $599 \pm 6$       | $461 \pm 6$       | $218 \pm 1$   |
| $69,9 \pm 0,4$   | $7 \pm 11$ | $-181 \pm 11$ | $23,8 \pm 0,4$ | $137,5 \pm 0,4$ | $610,71 \pm 6,02$ | $473 \pm 6$       | $216,6 \pm 1$ |
| $80,1 \pm 0,4$   | $8 \pm 11$ | $-173 \pm 11$ | $23,7 \pm 0,4$ | $136,2 \pm 0,4$ | $627,79 \pm 6,02$ | $490 \pm 6$       | $215,5 \pm 1$ |

Tab. 5.4 Výsledná data včetně nejistot měření z režimu 1750 min<sup>-1</sup> a 100% plynu.

| $t_{1m}$       | $M_p$                 | $m_{zv}$                  | $P_e$          | $p_{1k}$    | $p_{2k}$      | $p_{1m}$      | $p_{1t}$      |
|----------------|-----------------------|---------------------------|----------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| [°C]           | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [mg.zdvih <sup>-1</sup> ] | [kW]           | [mbar]      | [mbar]        | [mbar]        | [mbar]        |
| $20,3 \pm 0,4$ | $13,78 \pm 0,15$      | $65,61 \pm 0,15$          | $66,8 \pm 0,5$ | $1 \pm 11$  | $1423 \pm 11$ | $1413 \pm 11$ | $1387 \pm 11$ |
| $29,8 \pm 0,4$ | $13,79 \pm 0,15$      | $65,67 \pm 0,15$          | $66,3 \pm 0,5$ | $1 \pm 11$  | $1423 \pm 11$ | $1413 \pm 11$ | $1375 \pm 11$ |
| $40,4 \pm 0,4$ | $13,8 \pm 0,2$        | $65,73 \pm 0,15$          | $65,8 \pm 0,5$ | $2 \pm 11$  | $1422 \pm 11$ | $1413 \pm 11$ | $1352 \pm 11$ |
| $49,9 \pm 0,4$ | $13,66 \pm 0,15$      | $65,05 \pm 0,15$          | $64,7 \pm 0,5$ | $2 \pm 0,1$ | $1422 \pm 11$ | $1413 \pm 11$ | $1369 \pm 14$ |
| $59,8 \pm 0,4$ | $13,41 \pm 0,15$      | $63,84 \pm 0,15$          | $62,8 \pm 0,5$ | $2 \pm 11$  | $1422 \pm 11$ | $1413 \pm 11$ | $1426 \pm 14$ |
| $69,7 \pm 0,4$ | $13,23 \pm 0,15$      | $63 \pm 0,15$             | $61,7 \pm 0,5$ | $2 \pm 11$  | $1422 \pm 11$ | $1414 \pm 11$ | $1453 \pm 11$ |
| $80,4 \pm 0,4$ | $13,11 \pm 0,15$      | $62,44 \pm 0,15$          | $60,4 \pm 0,5$ | $3 \pm 11$  | $1422 \pm 11$ | $1416 \pm 11$ | $1476 \pm 11$ |

| $t_{1m}$       | $p_{2t}$     | $p_{ovl}$     | $t_{1k}$        | $t_{2k}$         | $t_{1t}$        | $t_{2t}$          | $M_e$         |
|----------------|--------------|---------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------------|---------------|
| [°C]           | [mbar]       | [mbar]        | [°C]            | [°C]             | [°C]            | [°C]              | [Nm]          |
| $20,3 \pm 0,4$ | $-8 \pm 11$  | $-418 \pm 11$ | $24,2 \pm 0,4$  | $160,66 \pm 0,4$ | $687,4 \pm 6$   | $515,08 \pm 6,01$ | $364,6 \pm 1$ |
| $29,8 \pm 0,4$ | $-8 \pm 11$  | $-413 \pm 11$ | $23,38 \pm 0,4$ | $160,42 \pm 0,4$ | $699 \pm 6$     | $523 \pm 6$       | $361,8 \pm 1$ |
| $40,4 \pm 0,4$ | $-9 \pm 11$  | $-414 \pm 11$ | $23,59 \pm 0,4$ | $161,8 \pm 0,4$  | $716,6 \pm 6,1$ | $538 \pm 6$       | $359 \pm 1$   |
| $49,9 \pm 0,4$ | $-10 \pm 11$ | $-438 \pm 11$ | $23,8 \pm 0,4$  | $162,8 \pm 0,4$  | $723 \pm 6$     | $544 \pm 6$       | $353 \pm 1$   |
| $59,8 \pm 0,4$ | $-11 \pm 11$ | $-459 \pm 11$ | $23,8 \pm 0,4$  | $163,9 \pm 0,4$  | $723 \pm 6$     | $543 \pm 6$       | $343 \pm 1$   |
| $69,7 \pm 0,4$ | $-11 \pm 11$ | $-465 \pm 12$ | $23,79 \pm 0,4$ | $164,7 \pm 0,4$  | $730 \pm 6$     | $548 \pm 6$       | $336,5 \pm 1$ |
| $80,4 \pm 0,4$ | $-12 \pm 11$ | $-469 \pm 11$ | $23,77 \pm 0,4$ | $166,2 \pm 0,4$  | $739 \pm 6$     | $555 \pm 6$       | $329,5 \pm 1$ |

Tab. 5.5 Výsledná data včetně nejistot měření z režimu 2500 min<sup>-1</sup> a 100% plynu.

| $t_{1m}$   | $M_p$                 | $m_{zv}$                  | $P_e$     | $p_{1k}$   | $p_{2k}$    | $p_{1m}$ | $p_{1t}$ |
|------------|-----------------------|---------------------------|-----------|------------|-------------|----------|----------|
| [°C]       | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [mg.zdvih <sup>-1</sup> ] | [kW]      | [mbar]     | [mbar]      | [mbar]   | [mbar]   |
| 20,2 ± 0,4 | 19,39±0,15            | 64,62±0,15                | 97,5±0,5  | -11±11     | 1526±11     | 1510±11  | 1292±11  |
| 30,3 ± 0,4 | 19,42±0,15            | 64,75±0,15                | 96,9±0,5  | -11±11     | 1528±11     | 1512±11  | 1267±11  |
| 40,3 ± 0,4 | 19,45±0,15            | 64,83±0,15                | 96,2±0,5  | -9±11      | 1528±11     | 1512±11  | 1240±11  |
| 50,2 ± 0,4 | 19,47±0,15            | 64,9±0,15                 | 95,4±0,5  | -8±11      | 1529±11     | 1512±11  | 1217±11  |
| 60,2 ± 0,4 | 19,43±0,15            | 64,78±0,15                | 94,5±0,5  | -7±11      | 1529±11     | 1513±11  | 1194±11  |
| 69,7 ± 0,4 | 19,48±0,15            | 64,95±0,15                | 93,6±0,5  | -7±11      | 1530±11     | 1513±11  | 1174±11  |
| 79,9 ± 0,4 | 19,51±0,15            | 65,02±0,15                | 92,8±0,5  | -6±11      | 1531±11     | 1513±11  | 1156±11  |
| $t_{1m}$   | $p_{2t}$              | $p_{ovl}$                 | $t_{1k}$  | $t_{2k}$   | $t_{1t}$    | $t_{2t}$ | $M_e$    |
| [°C]       | [mbar]                | [mbar]                    | [°C]      | [°C]       | [°C]        | [°C]     | [Nm]     |
| 20,2 ± 0,4 | 4±11                  | -237±11                   | 24,3±0,4  | 157,34±0,4 | 686±6       | 526±6    | 372,4±1  |
| 30,3 ± 0,4 | 3±11                  | -227±11                   | 24,3±0,4  | 158±0,4    | 700±6       | 538±6    | 370±1    |
| 40,3 ± 0,4 | 2±11                  | -229±11                   | 24,6±0,4  | 159±0,4    | 717±6       | 554±6    | 367,4±1  |
| 50,2 ± 0,4 | 2±11                  | -231±11                   | 25,15±0,4 | 160±0,4    | 734±6       | 569±6    | 364,4±1  |
| 60,2 ± 0,4 | 1±11                  | -227±11                   | 24,16±0,4 | 159,6±0,4  | 747,4±6     | 582±6    | 360,8±1  |
| 69,7 ± 0,4 | 0±11                  | -222±11                   | 24,67±0,4 | 160,9±0,4  | 762,56±6,01 | 597±6    | 357,4±1  |
| 79,9 ± 0,4 | 0±11                  | -222±11                   | 24,9±0,4  | 161,7±0,4  | 781±6       | 613,4±6  | 354,5±1  |

Tab. 5.6 Výsledná data včetně nejistot měření z režimu 3500 min<sup>-1</sup> a 100% plynu.

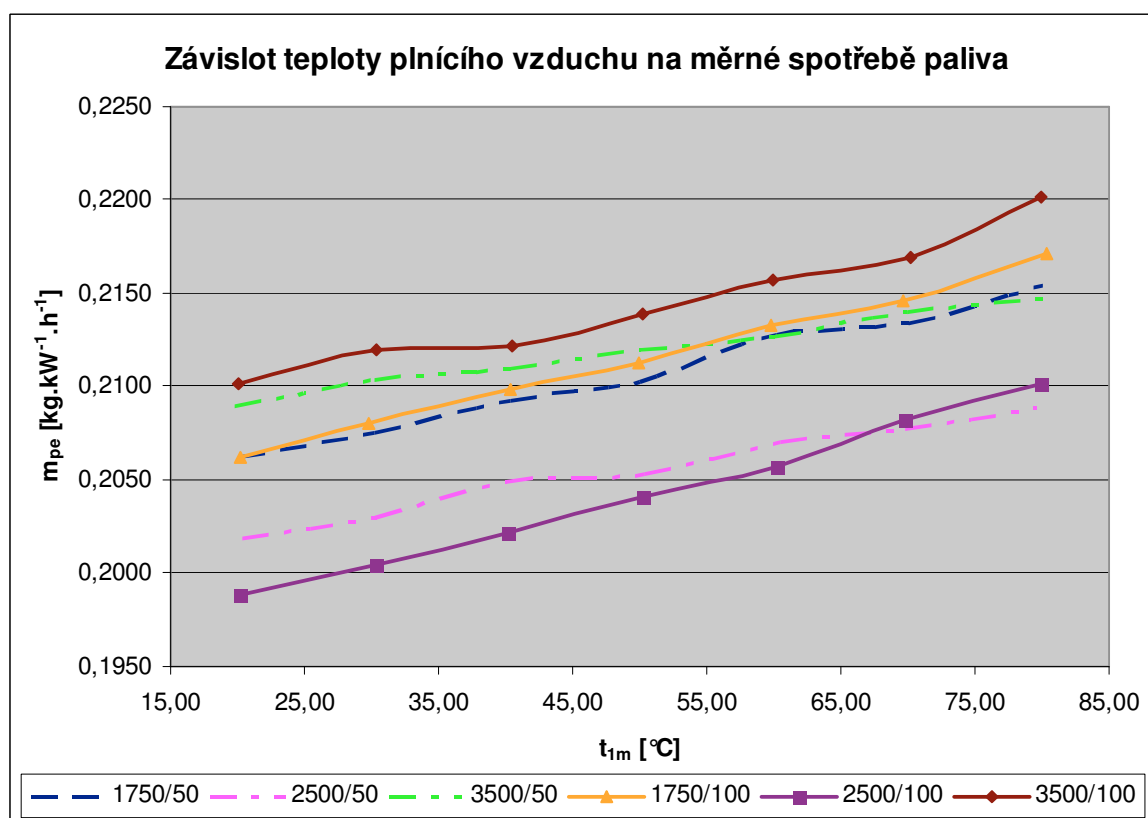
| $t_{1m}$    | $M_p$                 | $m_{zv}$                  | $P_e$      | $p_{1k}$    | $p_{2k}$    | $p_{1m}$    | $p_{1t}$ |
|-------------|-----------------------|---------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| [°C]        | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [mg.zdvih <sup>-1</sup> ] | [kW]       | [mbar]      | [mbar]      | [mbar]      | [mbar]   |
| 20,1 ± 0,4  | 25,85±0,15            | 61,54±0,15                | 123±0,5    | -32±11      | 1584±11     | 1554±11     | 1917±15  |
| 30,3 ± 0,4  | 25,96±0,15            | 61,82±0,15                | 122,5±0,5  | -30±11      | 1585±11     | 1555±11     | 1838±11  |
| 40,5 ± 0,4  | 25,83±0,15            | 61,51±0,15                | 121,7±0,5  | -29±11      | 1585±11     | 1556±11     | 1796±11  |
| 50,3 ± 0,4  | 25,93±0,15            | 61,74±0,15                | 121,3±0,5  | -26±11      | 1586±11     | 1557±11     | 1744±11  |
| 60 ± 0,4    | 25,97±0,15            | 61,83±0,15                | 120,4±0,5  | -25±11      | 1586±11     | 1557±11     | 1694±11  |
| 70,2 ± 0,4  | 25,92±0,15            | 61,70±0,15                | 119,5±0,5  | -24±11      | 1576±13     | 1548±13     | 1646±30  |
| 79,94 ± 0,4 | 25,24±0,15            | 60,10±0,15                | 114,6±0,5  | -20±11      | 1469±11     | 1442±11     | 1452±12  |
| $t_{1m}$    | $p_{2t}$              | $p_{ovl}$                 | $t_{1k}$   | $t_{2k}$    | $t_{1t}$    | $t_{2t}$    | $M_e$    |
| [°C]        | [mbar]                | [mbar]                    | [°C]       | [°C]        | [°C]        | [°C]        | [Nm]     |
| 20,1 ± 0,4  | 19±11                 | -166±11                   | 24,5±0,4   | 164,26±0,43 | 722±6       | 560±6       | 335,5±1  |
| 30,3 ± 0,4  | 14±11                 | -147±11                   | 24,68±0,48 | 164,1±0,4   | 735±6       | 573±6       | 334±1    |
| 40,5 ± 0,4  | 12±11                 | -143±11                   | 24,5±0,4   | 162,2±0,4   | 752±6       | 589±6       | 332±1    |
| 50,3 ± 0,4  | 6±11                  | -130±11                   | 24,21±0,4  | 161,6±0,4   | 768,58±6,03 | 606±6       | 331±1    |
| 60 ± 0,4    | 3±11                  | -121±11                   | 24,72±0,4  | 159,7±0,4   | 784,67±6,02 | 622±6       | 328±1    |
| 70,2 ± 0,4  | 1±11                  | -114±11                   | 24,18±0,4  | 160,4±0,4   | 802,8±6,2   | 641,28±6,07 | 326±1    |
| 79,94 ± 0,4 | 0±11                  | -96±11                    | 25,01±0,4  | 150,32±0,41 | 817,1±6,07  | 650,7±6,6   | 313±1    |

### 5.3 Závislost teploty plnicího vzduchu na hodinové spotřebě a měrné spotřebě paliva

Díky známým vstupním hodnotám lze snadno získat měrnou spotřebu paliva a to podle vztahu:

$$m_{pe} = \frac{M_p [kg.h^{-1}]}{P_e [kW]} [kg.kW^{-1}.h^{-1}] \quad (5.1)[17]$$

Konkrétní hodnoty jsou vypočteny v excelovském souboru v příloze C. Měrná spotřeba paliva při všech měřeních roste spolu s teplotou  $t_{1m}$  přibližně ve stejném poměru. Nárůst spotřeby není zcela lineární, ale rozdíl mezi minimální a maximální měrnou spotřebou paliva je v řádu tisícín  $[kg.kW^{-1}.h^{-1}]$  v maximálním zatížení motoru, v řádu setin  $[kg.kW^{-1}.h^{-1}]$  v polovičním zatížení motoru. Dále je z obr. 5.1 patrné, že nejmenší měrné spotřeby se dosahuje při otáčkách motoru  $n_m = 2500 \text{ min}^{-1}$  a v určitých bodech jsou spotřeby při těchto otáčkách motoru a rozdílných zatíženích stejné. Při 1750 otáčkách je měrná spotřeba prakticky stejná v obou zatíženích.



Obr. 5.1 Závislost teploty plnicího vzduchu na měrné spotřebě paliva.

Legenda:

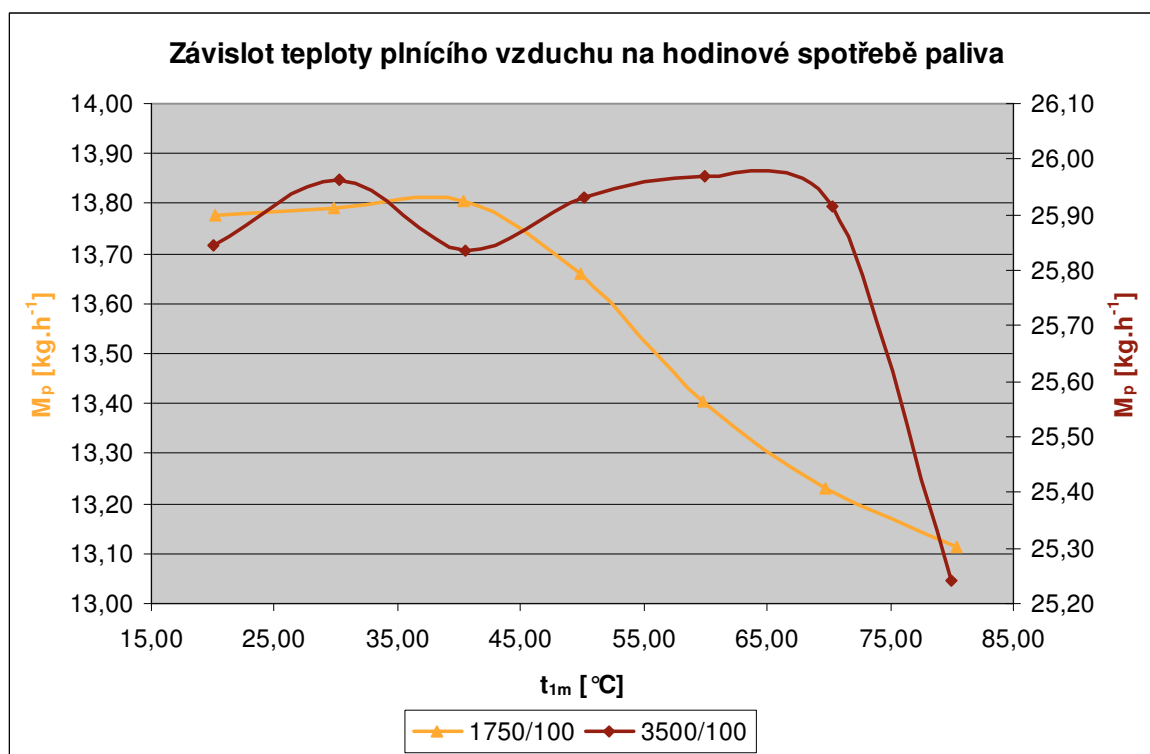
$m_{pe}$  – měrná spotřeba paliva  $[kg.kW^{-1}.h^{-1}]$

$t_{1m}$  – teplota plnicího vzduchu před vstupem do motoru (za mezichladičem)  $[^{\circ}C]$

Popis os – číslo před lomítkem symbolizuje otáčky motoru  $n_m [min^{-1}]$ , číslo za lomítkem zatížení motoru  $\alpha [\%]$ .

Ve všech měřených režimech s polovičním zatížením motoru jsou hodnoty hodinové spotřeby  $M_p$  téměř nezávislé na teplotě plnicího vzduchu. Mírné odchylky reprezentují rozšířenou chybu měření. Naměřené rozdíly při režimech, kdy  $n_m = 1750 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$  a maximálním zatížení motoru již tuto chybu překračují viz. obr. 5.2. Hodinová spotřeba při  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$  je vztažena k pravé a při  $n_m = 1750 \text{ min}^{-1}$  k levé ypsilonové ose. V obou případech je hodinová spotřeba nejnižší vždy při nejvyšší teplotě plnicího vzduchu. Při  $n_m = 1750 \text{ min}^{-1}$  nejprve mírně roste a od  $t_{lm} = 40 \text{ °C}$  klesá. Řídicí jednotka motoru (ŘJ) snižuje dávku paliva z důvodu kouřivosti motoru. V nízkých otáčkách motoru totiž není víření nasávaného vzduchu tak intenzivní jak ve vyšších a nedochází k dobrému promísení vzduchu s palivem, což má za následek vznik kouřivosti. Proto také při  $n_m = 2500 \text{ min}^{-1}$  spotřeba zůstává téměř stejná. Při těchto otáčkách již není nutné snižovat dávku paliva. Naopak pokud pomíneme chyby měření lze si všimnout, že spotřeba v tomto režimu mírně stoupá, protože ŘJ se snaží zvýšenou dávkou paliva udržet požadovaný točivý moment motoru.

Významný pokles spotřeby paliva při  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$  od cca  $t_{lm} = 70 \text{ °C}$  je z důvodu bezpečnostního. Teplota výfukových plynů  $t_{lt}$  se totiž blíží k nebezpečné hranici (při  $t_{lm} = 80 \text{ °C}$  dosáhla teplota  $t_{lt}$   $817 \text{ °C}$ ), proto ŘJ omezuje dávku paliva. Turbodmychadla většiny moderních vznětových motorů jsou konstruována na maximální teplotu výfukových plynů  $t_{lt} = 830 \text{ °C}$  (některá dokonce na  $860 \text{ °C}$ ).



Obr. 5.2 Závislost teploty plnicího vzduchu na hodinové spotřebě paliva.



Legenda k obr. 5.2:

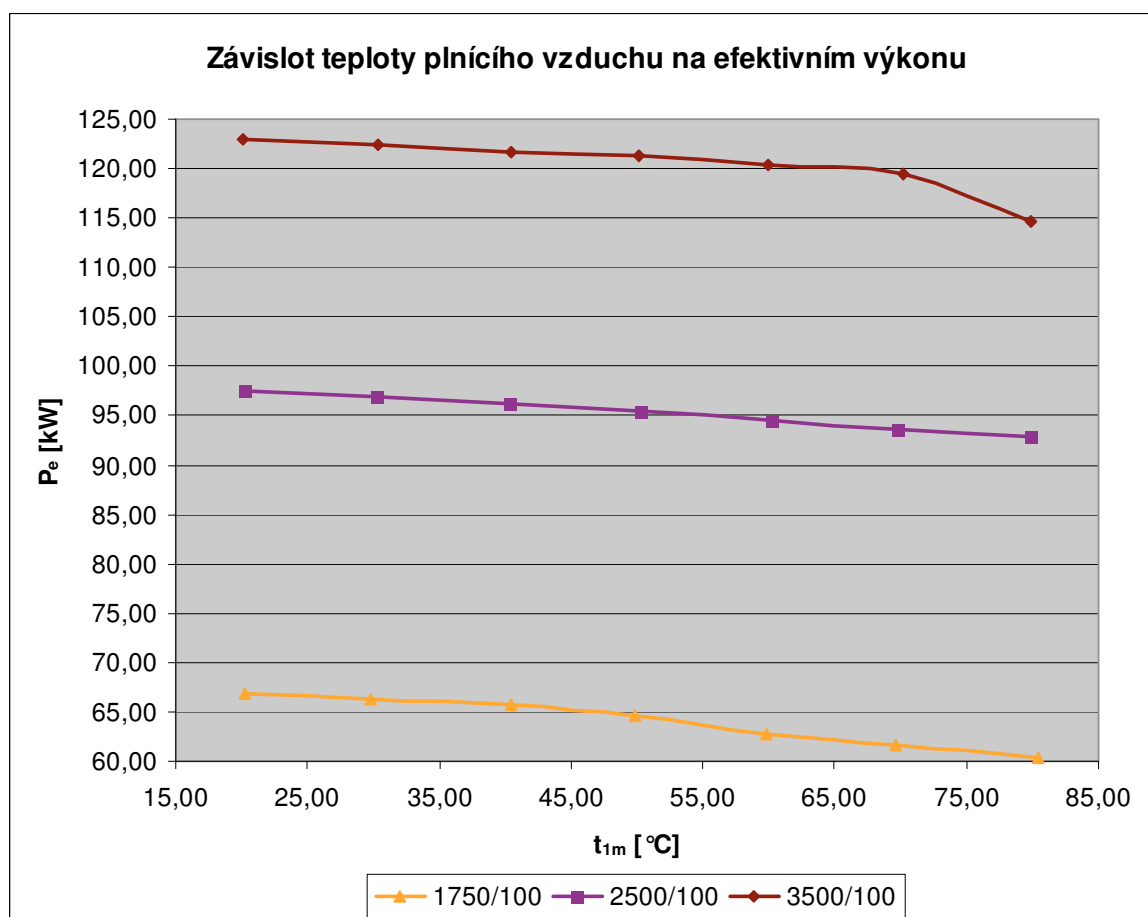
$M_p$  – hodinová spotřeba paliva [ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ]

$t_{1m}$  – teplota plnicího vzduchu před vstupem do motoru (za mezichladičem) [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Popis os – číslo před lomítkem symbolizuje otáčky motoru  $n_m$  [ $\text{min}^{-1}$ ], číslo za lomítkem zatížení motoru  $\alpha$  [%].

## 5.4 Závislost teploty plnicího vzduchu na točivém momentu a výkonu motoru

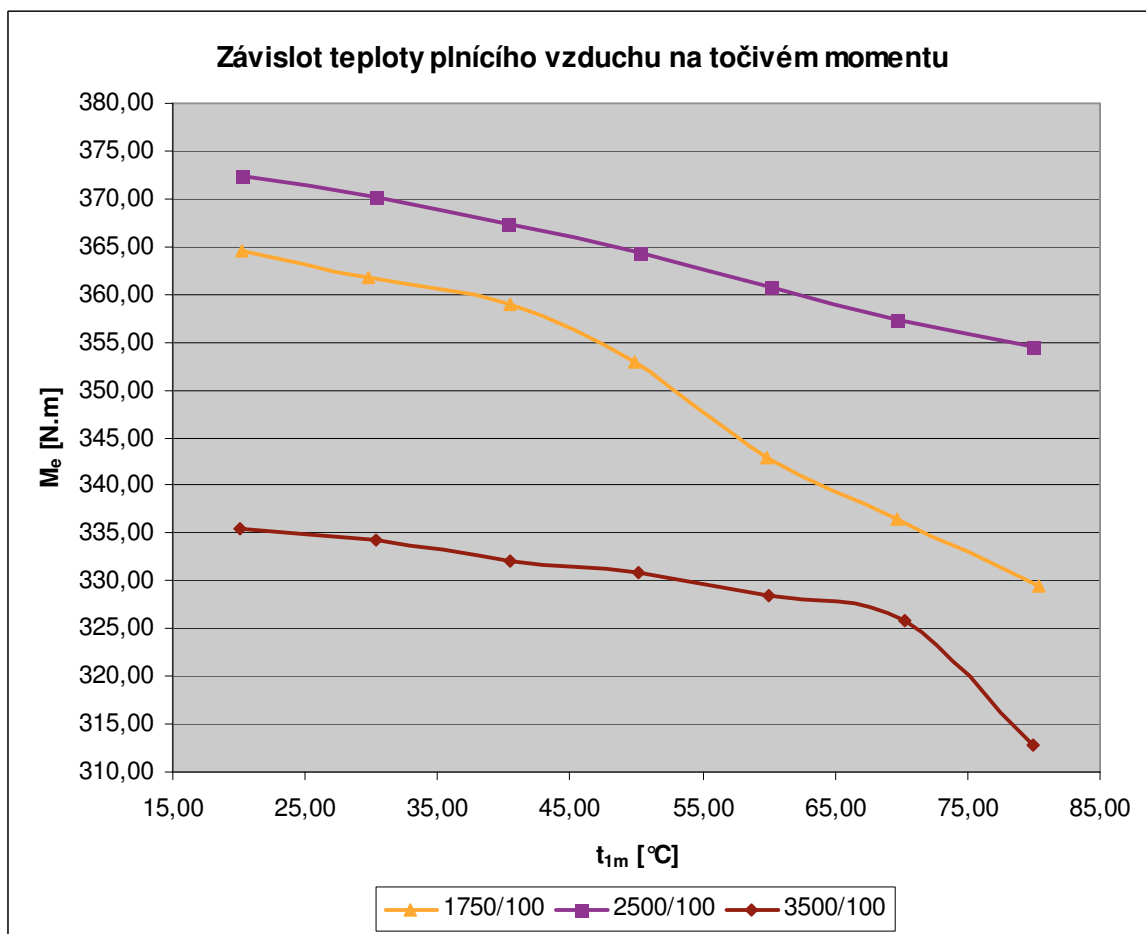
Efektivní výkon motoru je pouze přepočet, do něhož jako proměnné vstupují otáčky motoru a točivý moment motoru. Z toho vyplývá, že i průběhy obou veličin v závislosti na teplotě plnicího vzduchu mají stejný tvar, jak je patrné z obr. 5.3 a 5.4. Chyba měření je u výkonu motoru  $\pm 0,5$  kW a točivého momentu  $\pm 1$  N.m.



Obr. 5.3 Závislost teploty plnicího vzduchu  $t_{1m}$  na efektivním výkonu motoru  $P_e$  (100 % zatížení motoru)

Nejmenších rozdílů výkonů a točivých momentů bylo dosaženo v polovičním zatížení. Při  $n_m = 1750 \text{ min}^{-1}$  výkon s rostoucí teplotou plnicího vzduchu klesal od 49,6 k 47,5 kW a točivý moment od 270,4 k 259,1 N.m. Při  $n_m = 2500 \text{ min}^{-1}$  jsem naměřil pokles výkonu od 66,1 do 64,1 kW a točivého momentu od 252,5 do 244,9 N.m a při  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$  výkon klesl z 81 na 79 kW a točivý moment z 220,9 na 215,5. Ve všech případech je pokles zhruba čtyřprocentní.

V plném zatížení motoru jsou naměřené rozdíly výraznější. Při  $n_m = 2500 \text{ min}^{-1}$  naměřený rozdíl odpovídá rozdílu naměřenému v částečném zatížení (4,8 %). Větší rozdíly jsou znatelné v obou dalších měřených režimech, a to z důvodu omezení dávky paliva vysvětleného v kapitole 5.3. Při  $n_m = 1750 \text{ min}^{-1}$  jsou naměřené rozdíly cca 9,5 % tj. největší ze všech, což v absolutních číslech znamená pokles točivého momentu o citelných 35 N.m. Při  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$  jsou poklesy cca 7 %. Konkrétní hodnoty z měření lze vyčíst z tabulek v kapitole 5.2 vybrané průběhy pak z obrázků 5.3 a 5.4.



Obr. 5.4 Závislost teploty plnicího vzduchu  $t_{1m}$  na točivém momentu motoru  $M_e$  (100 % zatížení)

Jak jsem zmínil v teoretickém rozboru i výpočty prokázaly vliv teploty plnicího vzduchu na výkon motoru. Rozdíly mezi maximálním a minimálním výkonem jsou mnohem větší než ve skutečnosti. Pokud vyhodnotím jednotlivé vstupní hodnoty vstupující do výpočtu tak:

- absolutní plnicí tlak  $p_{ImA}$  je součet naměřených dat, a tudíž nevnáší do výpočtu žádnou chybu.
- hustota plnicího vzduchu  $\rho_{pl}$ , která se váže jen k teplotě a tlaku plnicího vzduchu také nevnáší do výpočtu žádnou chybu.
- hmotnostní tok vzduchu  $m_{vz}$  ovlivňuje zejména objemová účinnost  $\eta_d$ . Ve výpočtu je počítáno s konstantní hodnotou 0,9. Ve skutečnosti se, ale mění. Vypočtené hodnoty se neliší od naměřených (programem VCDS z MAF senzoru) o více jak 10 %. Vnášená chyba není tedy až tak markantní.
- Spotřebu paliva  $M_p$  nejvíce ovlivňuje součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$ . Za provozu motoru se mění, do výpočtu vstupuje jako konstanta. Jde tedy o další chybu vnášenou do výpočtu.
- Výhřevnost dostupného paliva (nafty)  $H_u$  se tolik nemění, aby způsobila větší nepřesnost výpočtu.
- Ostatní hodnoty jsou konstanty.

V případě, že bychom měli k dispozici přesnější hodnoty  $\lambda$  a  $\eta_d$  vzhledem k provozním režimům motoru, výpočty by byly mnohem přesnější nebo dokonce srovnatelné s naměřenými hodnotami. Pak se naskýtá možnost pro využití těchto výpočtů, např. při zpracování dat z jízdních zkoušek při kterých výkon nejde měřit přímo.

Největší rozdíl ve výpočtech činil 28,97 kW a to při otáčkách motoru  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$  a maximálním zatížení. Nejmenší pak 7,9 kW při otáčkách motoru  $n_m = 1750 \text{ min}^{-1}$  a polovičním zatížení.

Srovnání vypočtených a naměřených hodnot je nejlépe patrné ze souhrnných tabulek. Kromě rozdílů výkonů zobrazují i rozdíly naměřených a vypočtených hodnot spotřeby paliva a vzduchu. Rozdíly jsou vyjádřeny, jak v absolutních číslech, tak procentuelně. Za referenční hodnotu je vždy požadovaná hodnota naměřená.

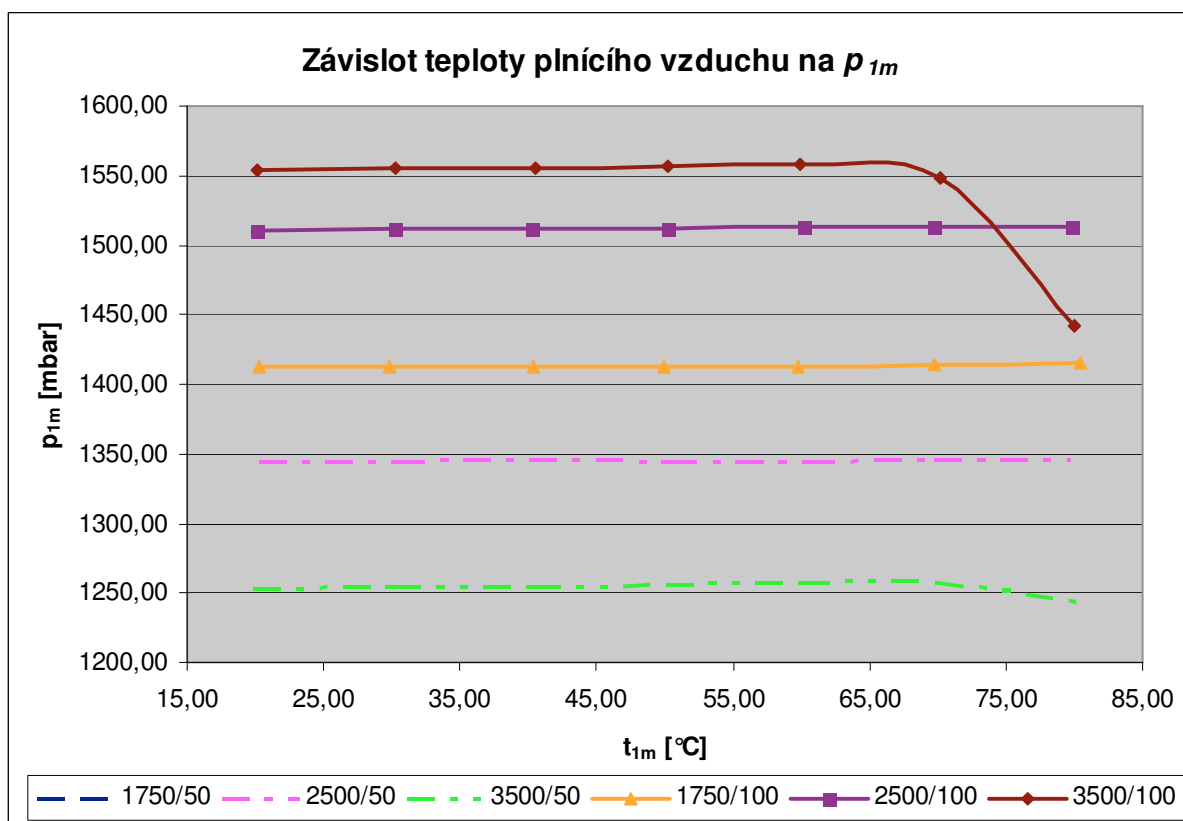
Tab. 5.7 Srovnání vybraných naměřených a vypočtených hodnot při režimu 1750/100

| $t_{1m}$     | $T_{1m}$     | $p_{1mA}$             | $\rho_{vz}$           | $m_{vz,teor}$         | $m_{vz,VCDS}$         | $M_{p,teor}$          | $M_p$                 | $Q_p$    | $P_{e,teor}$ | $P_e$       |
|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|--------------|-------------|
| [°C]         | [K]          | [Pa]                  | [kg.m <sup>-3</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]     | [kW]         | [kW]        |
| 20,00        | 293,15       | 239148                | 2,842                 | 264,3                 | 238,5                 | 14,02                 | 13,78                 | 165,5    | 66,22        | 66,81       |
| 30,00        | 303,15       | 239168                | 2,749                 | 255,6                 | 233,8                 | 13,56                 | 13,79                 | 160,1    | 64,04        | 66,30       |
| 40,00        | 313,15       | 239210                | 2,662                 | 247,5                 | 229,0                 | 13,13                 | 13,80                 | 155,0    | 62,00        | 65,79       |
| 50,00        | 323,15       | 239198                | 2,579                 | 239,8                 | 225,3                 | 12,72                 | 13,66                 | 150,2    | 60,08        | 64,66       |
| 60,00        | 333,15       | 239180                | 2,502                 | 232,6                 | 221,4                 | 12,34                 | 13,41                 | 145,7    | 58,27        | 62,84       |
| 70,00        | 343,15       | 239332                | 2,430                 | 226,0                 | 213,3                 | 11,99                 | 13,23                 | 141,5    | 56,61        | 61,66       |
| 80,00        | 353,15       | 239418                | 2,362                 | 219,7                 | 213,6                 | 11,65                 | 13,11                 | 137,6    | 55,03        | 60,39       |
|              |              |                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\Delta$ | <b>11,19</b> | <b>6,43</b> |
| $\Delta P_e$ | $\Delta P_e$ | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta M_p$          | $\Delta M_p$          |                       |                       |          |              |             |
| [kW]         | [%]          | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   |                       |                       |          |              |             |
| 0,60         | 0,89         | 25,8                  | 9,76                  | -0,24                 | -1,77                 |                       |                       |          |              |             |
| 2,26         | 3,41         | 21,8                  | 8,53                  | 0,23                  | 1,66                  |                       |                       |          |              |             |
| 3,79         | 5,76         | 18,5                  | 7,46                  | 0,67                  | 4,88                  |                       |                       |          |              |             |
| 4,58         | 7,09         | 14,5                  | 6,06                  | 0,94                  | 6,86                  |                       |                       |          |              |             |
| 4,57         | 7,27         | 11,2                  | 4,80                  | 1,07                  | 7,95                  |                       |                       |          |              |             |
| 5,05         | 8,19         | 12,6                  | 5,60                  | 1,24                  | 9,39                  |                       |                       |          |              |             |
| 5,36         | 8,88         | 6,0                   | 2,74                  | 1,46                  | 11,13                 |                       |                       |          |              |             |

Ostatní srovnávací tabulky jsou v příloze D.

## 5.5 Závislost teploty plnicího vzduchu na plnicím tlaku

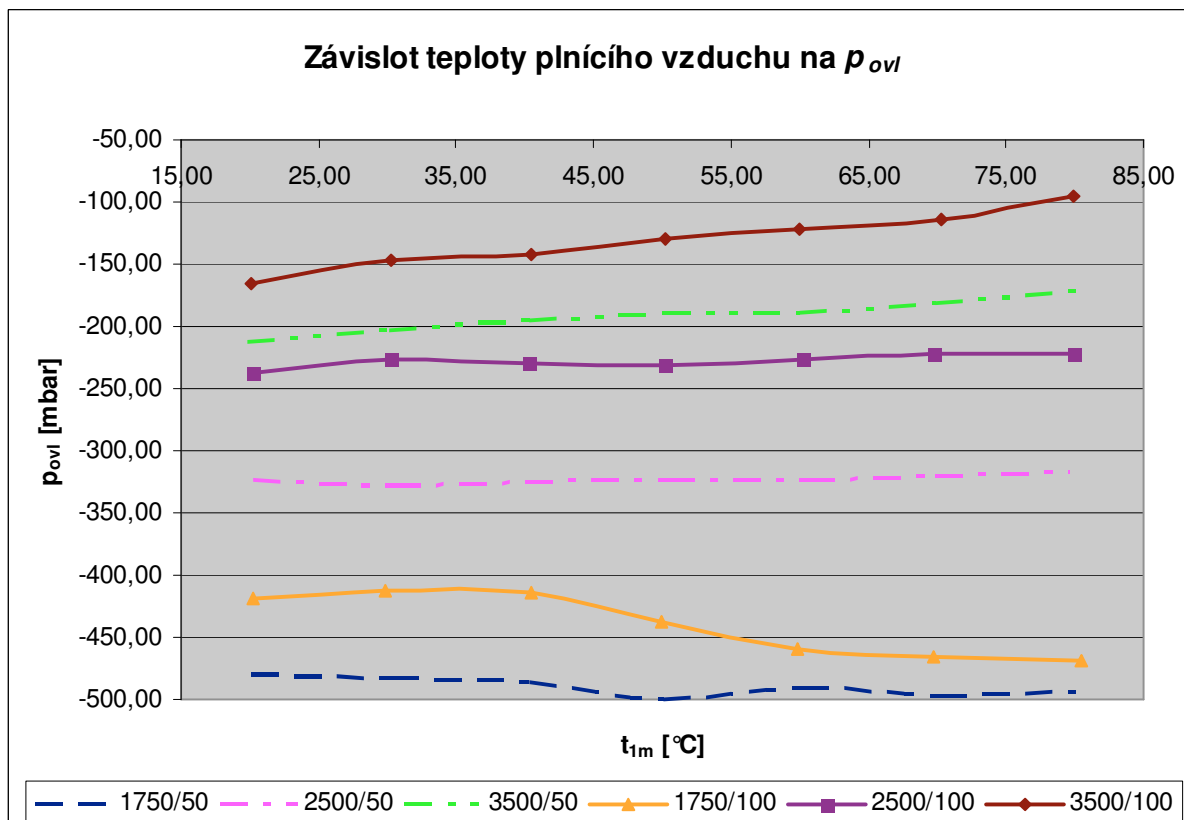
Vyjma jednoho měřeného režimu zůstává plnicí tlak  $p_{1m}$  po celou dobu téměř stejný (minimální rozdíly zahrnují chyby měření) díky regulaci plnicího tlaku. Turbodmychadlo na měřeném motoru je vybaveno VNT regulací plnicího tlaku na straně turbíny (natačením lopatek umístěných v turbínové skříni se vlivem škrcezení mění rychlost proudění výfukových plynů a tím dochází k plynulé regulaci plnicího tlaku  $p_{1m}$ ) s podtlakovým ovladačem lopatek. A právě na podtlaku v ovladači (obr. 5.6) je možné pozorovat, jak se mění podtlak resp. poloha lopatek, tak aby vlivem změny teploty plnicího vzduchu zůstal plnicí tlak stejný. Při atmosférickém tlaku (relativní tlak roven nule) v dóze ovladače jsou lopatky maximálně otevřeny. Při podtlaku v ovladači  $p_{ovl} = -700$  mbar jsou lopatky co nejvíce otevřeny. Procentuelní vyjádření polohy ovladače  $N_{pol}$  (graf v příloze C) reprezentuje přepočet výstupního napětíového signálu snímače polohy ovladače (0V, resp. 0% znamená nejmenší otevření lopatek a 5V resp. 100% maximální otevření).

Obr. 5.5 Změna plnicího tlaku  $p_{1m}$  v závislosti na  $t_{1m}$ .

Výrazný pokles plnicího tlaku  $p_{1m}$  při otáčkách motoru  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$  od cca  $t_{1m} = 70 \text{ °C}$  je důsledek dříve zmíněného omezení dávky paliva v tomto režimu, poněvadž se snížením množství paliva klesá samozřejmě i energie výfukových plynů a tím pádem i tlak výfukových plynů, jak je vidno z obr. 5.7.

Plnicí tlak  $p_{2k}$  kopíruje stejné křivky jako plnicí tlak  $p_{1m}$ . Jen v absolutních hodnotách je o asi o dvě procenta vyšší a to ve všech měřených režimech. Tlaková ztráta je způsobená jak vedením tak mezichladičem plnicího vzduchu.

Největší změna tlaku v dóze ovladače je jako u téměř všech ostatních veličin při  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$  a maximálním zatížení motoru. Celkový rozdíl zde činí 70 mbar (změna polohy asi o 7,4 procenta) což způsobilo pokles plnicího tlaku  $p_{1m}$  cca o 110 mbar a výkonu motoru o zhruba 8,4 kW. Je tedy vidět, že i relativně malá změna podtlaku v ovladači může působit výrazněji na ostatní parametry. Je to také jeden z důvodů, proč jsou v poslední době pneumatické (přetlakové i podtlakové) ovladače vybavovány snímačem polohy.



Obr. 5.6 Změna ovládacího podtlaku  $p_{ovl}$  v závislosti na  $t_{1m}$ .

S plnicím tlakem respektive s tlakem na výstupu z kompresorové části turbodmychadla je vhodné okomentovat i změnu tlaku na vstupu do kompresorové části resp. mezi vzduchovým filtrem a vstupem a také změny teplot na vstupu a výstupu. Změny tlaku  $p_{1k}$  jsou naprosto marginální v porovnání se změnou teploty  $t_{1m}$ . Např. při nejprůkaznějším režimu 3500/100 se hodnota tlaku  $p_{1k}$  pohybuje od -32,3 mbar ( $t_{1m} = 20^\circ\text{C}$ ) do -19,5 mbar ( $t_{1m} = 80^\circ\text{C}$ ). Mnohem větší změnu způsobí zanášející se vzduchový filtr, kdy hodnota  $p_{1k} = -150$  mbar nebo i méně.

Co se týče teplot tak pro teplotu  $t_{1k}$  platí obdoba toho co pro tlak  $p_{1k}$ . Závislost na teplotě plnicího vzduchu  $t_{1m}$  není žádná. Minimální změny teploty lze přisuzovat vysálanému teplu od motoru. Patrný vliv teploty  $t_{1m}$  je jasný na teplotě plnicího vzduchu za kompresorovou skříní  $t_{2k}$ . Nejedná se o výraznější změny teploty díky tomu, že plnicí tlak je VNT regulací udržován na stejné hodnotě. Změny teplot  $t_{2k}$  v jednotlivých režimech jsou následující:

- 1750/50 – teplota nejprve rychle vzroste. Nárůst  $t_{1m}$  o  $10^\circ\text{C}$  odpovídá stejnému nárůstu  $t_{2k}$ . Pak mírně klesá, aby zase mírně stoupala (téměř lineárně). Celkový nárůst byl  $+13^\circ\text{C}$  proti počáteční hodnotě  $t_{2k} = 133,5^\circ\text{C}$ .

- 2500/50 – teplota také rostla, ale velmi pozvolně s mírným poklesem ke konci křivky. V součtu byl růst  $t_{2k} + 3^{\circ}\text{C}$ .
- 3500/50 – mírný pokles o cca  $5^{\circ}\text{C}$ .
- 1750/100 – zpočátku se drží na stejné hodnotě, pak mírný pokles s celkovým nárůstem cca  $6^{\circ}\text{C}$ .
- 2500/100 – průběh křivky je velice podobný křivce z předchozího režimu. Jen hodnoty jsou trochu nižší. Nárůst o cca  $4^{\circ}\text{C}$ .
- 3500/100 – křivka se podobá horské dráze. Nejprve bez výrazné změny, pak mírný pokles, vzápětí mírný nárůst a nakonec strmý pokles. Z původních  $164,3$  zůstalo  $150,3^{\circ}\text{C}$ .

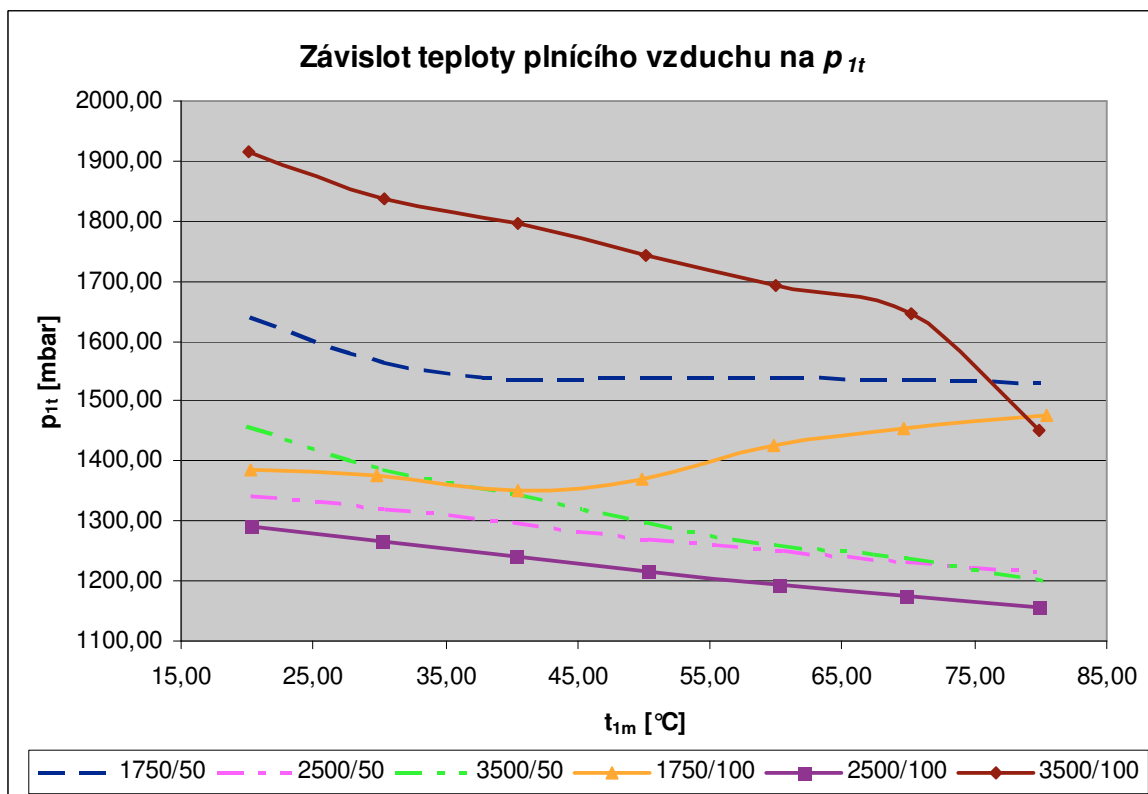
## 5.6 Vliv teploty plnicího vzduchu na výfukové plyny

Tlak a teplota výfukových plynů na vstupu a na výstupu z turbínové skříně jsou poslední měřené veličiny uvedené v tomto srovnání. Působení teploty plnicího vzduchu na tlak výfukových plynů  $p_{1t}$  nejlépe prezentují oba režimy při  $n_m = 2500 \text{ min}^{-1}$  a režim polovičního zatížení při  $n_m = 3500 \text{ min}^{-1}$ , protože v těchto režimech je téměř konstantní dávka paliva, a proto jí nemůže být tlak ovlivněn. Jiná situace nastává při maximálním zatížení motoru a  $3500 \text{ min}^{-1}$ . Zde je pokles tlaku způsoben hlavně sníženou dávkou paliva. Naopak k jedinému nárůstu tlaku dochází při  $n_m 1750 \text{ min}^{-1}$  a maximálním zatížení motoru a při polovičním zatížení tohoto režimu je tlak  $p_{1t}$  od teploty  $t_{1m} 35^{\circ}\text{C}$  a víc přibližně stejný. Kompletní přehled závislostí ukazuje obr. 5.7.

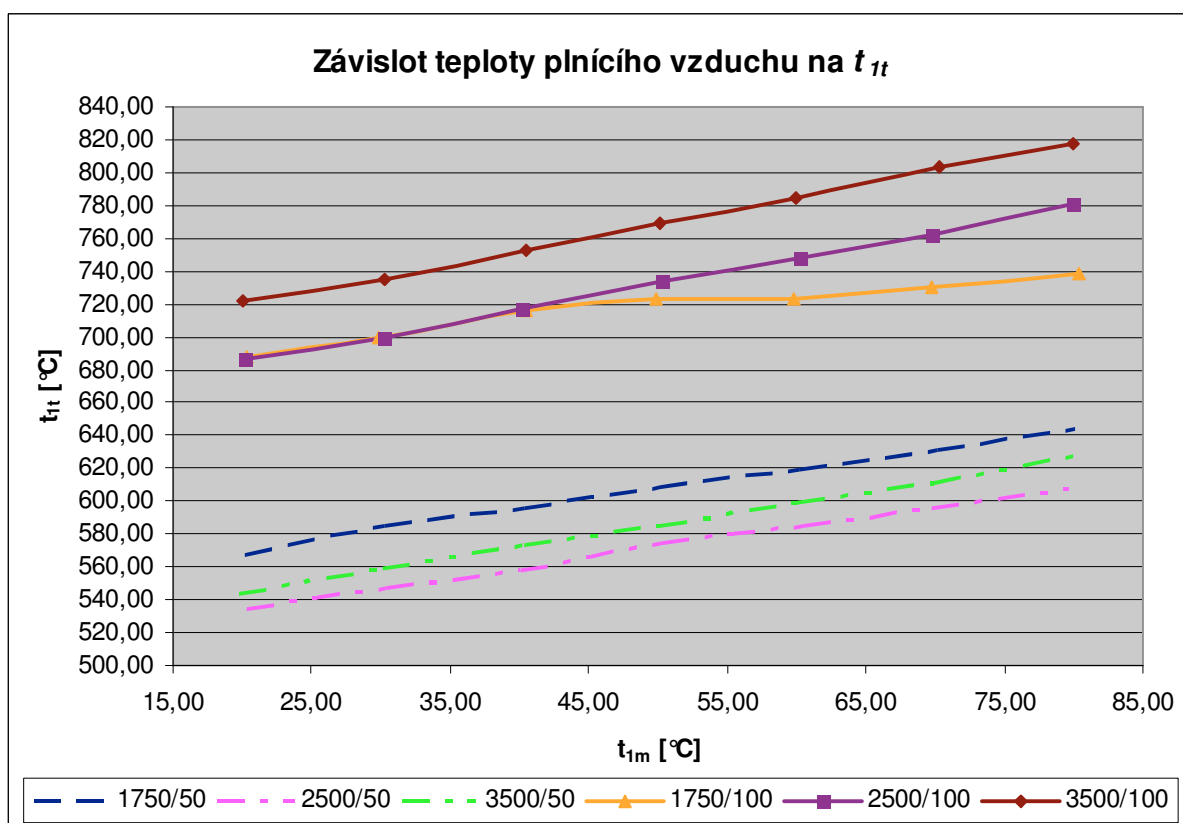
Tlaky výfukových plynů  $p_{2t}$  nabývají ve všech režimech téměř stejných zanedbatelných hodnot. Tyto hodnoty se jen minimálně liší od hodnot atmosférického tlaku, protože výfukový systém nebyl vybaven katalyzátorem, filtrem pevných částic a výfuková klapka, kterou je možné protitlak od těchto součástí simulovat, byla zcela otevřená. Nedá se tedy hovořit o vlivu teploty  $t_{1m}$  na tlak  $p_{2t}$ .

Křivky teplot výfukových plynů  $t_{1t}$  a  $t_{2t}$  mají velmi podobné průběhy. Vlivem odevzané energie ve prospěch roztočení lopatkových kol turbodmychadla a ztrát jsou hodnoty  $t_{2t}$  zhruba o 20 až 30 % nižší. Zvýšení teploty  $t_{1m}$  o  $10^{\circ}\text{C}$  v jednotlivých krocích má za následek růst teploty  $t_{1t}$  až o  $18^{\circ}\text{C}$ . Někde jsou nárůsty mnohem nižší nebo dokonce skoro žádné viz. obr.5.8. Přesněji jde o režim plného zatížení motoru při  $n_m 1750 \text{ min}^{-1}$ , ve

kterém je průběh odlišný. Ostatní křivky jsou jako přes kopírák jen posunuty v absolutních číslech.



Obr. 5.7 Průběhy tlaků  $p_{1t}$  v důsledku změn teploty  $t_{1m}$



Obr. 5.8 Teplota plnicího vzduchu  $t_{1t}$  versus teploty výfukových plynů  $t_{1t}$ .



## 5.7 Působení teploty plnicího vzduchu na střední efektivní tlak a efektivní účinnost

Pro výpočet středního efektivního tlaku při známých hodnotách točivého momentu motoru můžeme použít vztah.

$$p_e = \frac{M \cdot 2\pi}{V_z \cdot k} \quad (Pa) \quad (5.2)[6]$$

kde:

$p_e$  – střední efektivní tlak (Pa)

$V_z$  – zdvihový objem motoru ( $m^3$ )

$k$  – 0,5 (čtyřtakt, pracovní cyklus je každou druhou otáčku motoru)

$M$  – točivý moment motoru (N.m)

K výpočtu střední efektivní účinnosti jsem použil vztah.

$$\eta_e = \frac{P_e \cdot 3600}{M_p \cdot H_d} \quad (5.3)[6]$$

kde:

$P_e$  – střední efektivní výkon (kW)

$M_p$  – spotřeba paliva ( $kg \cdot h^{-1}$ )

$H_u$  – dolní výhřevnost paliva,  $42500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Rozdíl středních efektivních tlaků v důsledku změny teploty nasávaného vzduchu se v jednotlivých měřicích režimech pohybuje od 0,03 MPa až po 0,22 MPa. A rozdíly efektivní účinnosti se mění pouze od 1 do 2 procent. Zdánlivě malá změna efektivní účinnosti souvisí s poměrně znatelnými změnami středního efektivního tlaku, které způsobí rozdíl v dosaženém výkonu až 8,35 kW (3500/100) a točivém momentu 35 N.m (1750/100).

Tab. 5.8 Kompletní přehled výpočtů  $p_e$  a  $\eta_e$ 

| 1750/50 |         |       |                       |       |          | 1750/100 |         |       |                       |        |          |
|---------|---------|-------|-----------------------|-------|----------|----------|---------|-------|-----------------------|--------|----------|
| $M_e$   | $p_e$   | $p_e$ | $M_p$                 | $P_e$ | $\eta_e$ | $M_e$    | $p_e$   | $p_e$ | $M_p$                 | $P_e$  | $\eta_e$ |
| [Nm]    | [Pa]    | [MPa] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]  | [1]      | [Nm]     | [Pa]    | [MPa] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]   | [1]      |
| 270,36  | 1726343 | 1,73  | 10,22                 | 49,55 | 0,411    | 364,58   | 2327971 | 2,33  | 13,78                 | 66,81  | 0,411    |
| 268,98  | 1717532 | 1,72  | 10,23                 | 49,29 | 0,408    | 361,76   | 2309965 | 2,31  | 13,79                 | 66,30  | 0,407    |
| 267,52  | 1708209 | 1,71  | 10,26                 | 49,03 | 0,405    | 359,00   | 2292341 | 2,29  | 13,80                 | 65,79  | 0,404    |
| 265,86  | 1697609 | 1,70  | 10,24                 | 48,72 | 0,403    | 352,86   | 2253135 | 2,25  | 13,66                 | 64,66  | 0,401    |
| 262,72  | 1677559 | 1,68  | 10,24                 | 48,15 | 0,398    | 342,92   | 2189665 | 2,19  | 13,41                 | 62,84  | 0,397    |
| 261,54  | 1670025 | 1,67  | 10,23                 | 47,93 | 0,397    | 336,46   | 2148415 | 2,15  | 13,23                 | 61,66  | 0,395    |
| 259,12  | 1654572 | 1,65  | 10,23                 | 47,49 | 0,393    | 329,52   | 2104101 | 2,10  | 13,11                 | 60,39  | 0,390    |
| 2500/50 |         |       |                       |       |          | 2500/100 |         |       |                       |        |          |
| $M_e$   | $p_e$   | $p_e$ | $M_p$                 | $P_e$ | $\eta_e$ | $M_e$    | $p_e$   | $p_e$ | $M_p$                 | $P_e$  | $\eta_e$ |
| [Nm]    | [Pa]    | [MPa] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]  | [1]      | [Nm]     | [Pa]    | [MPa] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]   | [1]      |
| 252,48  | 1612173 | 1,61  | 13,34                 | 66,10 | 0,420    | 372,42   | 2378032 | 2,38  | 19,39                 | 97,50  | 0,426    |
| 251,26  | 1604383 | 1,60  | 13,35                 | 65,78 | 0,417    | 370,20   | 2363857 | 2,36  | 19,42                 | 96,92  | 0,423    |
| 250,20  | 1597615 | 1,60  | 13,42                 | 65,50 | 0,413    | 367,42   | 2346106 | 2,35  | 19,45                 | 96,19  | 0,419    |
| 248,42  | 1586249 | 1,59  | 13,35                 | 65,04 | 0,413    | 364,42   | 2326950 | 2,33  | 19,47                 | 95,40  | 0,415    |
| 247,26  | 1578842 | 1,58  | 13,40                 | 64,73 | 0,409    | 360,78   | 2303707 | 2,30  | 19,43                 | 94,45  | 0,412    |
| 246,16  | 1571818 | 1,57  | 13,39                 | 64,44 | 0,408    | 357,38   | 2281997 | 2,28  | 19,48                 | 93,56  | 0,407    |
| 244,92  | 1563900 | 1,56  | 13,39                 | 64,12 | 0,406    | 354,52   | 2263735 | 2,26  | 19,51                 | 92,81  | 0,403    |
| 3500/50 |         |       |                       |       |          | 3500/100 |         |       |                       |        |          |
| $M_e$   | $p_e$   | $p_e$ | $M_p$                 | $P_e$ | $\eta_e$ | $M_e$    | $p_e$   | $p_e$ | $M_p$                 | $P_e$  | $\eta_e$ |
| [Nm]    | [Pa]    | [MPa] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]  | [1]      | [Nm]     | [Pa]    | [MPa] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]   | [1]      |
| 220,92  | 1410652 | 1,41  | 16,92                 | 80,97 | 0,405    | 335,54   | 2142541 | 2,14  | 25,85                 | 122,98 | 0,403    |
| 219,90  | 1404139 | 1,40  | 16,96                 | 80,60 | 0,403    | 334,18   | 2133857 | 2,13  | 25,96                 | 122,48 | 0,400    |
| 219,28  | 1400180 | 1,40  | 16,95                 | 80,37 | 0,402    | 332,16   | 2120958 | 2,12  | 25,83                 | 121,74 | 0,399    |
| 218,72  | 1396604 | 1,40  | 16,99                 | 80,17 | 0,400    | 330,82   | 2112402 | 2,11  | 25,93                 | 121,25 | 0,396    |
| 217,80  | 1390729 | 1,39  | 16,98                 | 79,83 | 0,398    | 328,42   | 2097077 | 2,10  | 25,97                 | 120,37 | 0,393    |
| 216,58  | 1382939 | 1,38  | 16,98                 | 79,38 | 0,396    | 325,94   | 2081241 | 2,08  | 25,92                 | 119,46 | 0,390    |
| 215,48  | 1375915 | 1,38  | 16,96                 | 78,98 | 0,395    | 312,76   | 1997082 | 2,00  | 25,24                 | 114,63 | 0,385    |

## 5.8 Zjednodušený návrh mezichladiče plnicího vzduchu

Zjednodušený výpočet čelní plochy mezichladiče stlačeného vzduchu jsem zvolil jako jeden z možných způsobů jak demonstrovat technickou náročnost chlazení plnicího vzduchu z počáteční hodnoty na požadovanou při použití na sériovém vozidle. Jedná se o tepelný výměník vzduch – vzduch, v některých vozidlech se používá i typ vzduch – voda.

Pro výpočet potřebujeme znát:

$M_{vzl}$  – množství plnicího vzduchu protékající přes mezichladič do motoru, zvolil jsem naměřenou hodnotu z MAF senzoru .

- $t_{1m}$  – teplotu na výstupu z mezichladiče (požadovanou)  
 $t_{2k}$  – teplotu na vstupu do mezichladiče  
 $t_{1ch}$  – teplotu okolního vzduchu před mezichladičem, zvolil jsem 25 °C  
 $t_{2ch}$  – teplotu okolního vzduchu za mezichladičem, zvolil jsem 35 °C  
 $\rho_a$  – hustotu atmosférického vzduchu = 1,18 kg.m<sup>-3</sup>  
 $c_{p1}$  – měrnou tepelnou kapacitu vzduchu = 1,01 kJ.kg.K<sup>-1</sup>  
 $v_{vzch}$  – rychlost proudění okolního vzduchu přes mezichladič, rychlost vozidla

Postup:

Tepelný tok odvedený chladičem neboli teplo, které musí chladič odvést pro snížení teploty z  $t_{2k}$  na  $t_{1m}$ .

$$Q_{MCH} = M_{vz1} \cdot c_{p1} \cdot (t_{2k} - t_{1m}) \quad kW \quad (5.4)[6]$$

Množství chladícího (okolního) vzduchu, které musí protékat chladičem pro dosažení požadovaného výkonu chladiče  $Q_{MCH}$ .

$$M_{chvz} = \frac{Q_{MCH}}{c_{p1} \cdot \Delta T_{ch}} \quad kg.h^{-1} \quad (5.5)[6]$$

Čelní plocha

$$S_{\epsilon} = \frac{M_{chvz}}{\rho_a \cdot v_{vzch}} \quad m^2 \quad (5.6)[6]$$

Vzorec pro výpočet minimální čelní plochy je velmi zjednodušený, ale pro představu je vhodný. Ve skutečnosti je potřeba brát v úvahu činnou plochu.

Výsledky pro všechny režimy jsou v tabulkách

Tab. 5.9 Výsledky z výpočtů mezichladiče, poloviční zatížení motoru

| 1750/50               |          |          |                       |           |                       |                   |                   |                   |
|-----------------------|----------|----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $M_{vz1}$             | $t_{2k}$ | $t_{1m}$ | $Q_{MCH}$             | $Q_{MCH}$ | $M_{chvz}$            | $S_{\epsilon 15}$ | $S_{\epsilon 20}$ | $S_{\epsilon 30}$ |
| [kg.h <sup>-1</sup> ] | [°C]     | [°C]     | [kJ.h <sup>-1</sup> ] | [kW]      | [kg.h <sup>-1</sup> ] | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    |
| 217,6                 | 133,46   | 20,00    | 24930,35              | 6,93      | 2468,35               | 0,39              | 0,29              | 0,20              |
| 211,7                 | 140,25   | 30,00    | 23572,11              | 6,55      | 2333,87               | 0,37              | 0,28              | 0,18              |
| 208,0                 | 138,67   | 40,00    | 20729,09              | 5,76      | 2052,39               | 0,33              | 0,24              | 0,16              |
| 203,5                 | 139,56   | 50,00    | 18405,99              | 5,11      | 1822,38               | 0,29              | 0,22              | 0,14              |
| 198,2                 | 141,05   | 60,00    | 16223,67              | 4,51      | 1606,3                | 0,25              | 0,19              | 0,13              |
| 195,2                 | 142,21   | 70,00    | 14239,17              | 3,96      | 1409,82               | 0,22              | 0,17              | 0,11              |
| 193,1                 | 143,14   | 80,00    | 12313,67              | 3,42      | 1219,18               | 0,19              | 0,14              | 0,10              |
| 2500/50               |          |          |                       |           |                       |                   |                   |                   |
| $M_{vz1}$             | $t_{2k}$ | $t_{1m}$ | $Q_{MCH}$             | $Q_{MCH}$ | $M_{chvz}$            | $S_{\epsilon 15}$ | $S_{\epsilon 20}$ | $S_{\epsilon 30}$ |
| [kg.h <sup>-1</sup> ] | [°C]     | [°C]     | [kJ.h <sup>-1</sup> ] | [kW]      | [kg.h <sup>-1</sup> ] | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    |
| 350,4                 | 143,70   | 20,00    | 43774,97              | 12,16     | 4334,16               | 0,69              | 0,52              | 0,34              |
| 342,9                 | 143,62   | 30,00    | 39350,59              | 10,93     | 3896,1                | 0,62              | 0,46              | 0,31              |
| 334,5                 | 144,43   | 40,00    | 35284,32              | 9,80      | 3493,5                | 0,55              | 0,42              | 0,28              |
| 328,0                 | 144,98   | 50,00    | 31467,96              | 8,74      | 3115,64               | 0,49              | 0,37              | 0,25              |
| 319,6                 | 146,58   | 60,00    | 27946,56              | 7,76      | 2766,99               | 0,44              | 0,33              | 0,22              |
| 315,2                 | 146,30   | 70,00    | 24290,28              | 6,75      | 2404,98               | 0,38              | 0,29              | 0,19              |
| 309,6                 | 146,88   | 80,00    | 20916,35              | 5,81      | 2070,93               | 0,33              | 0,25              | 0,16              |
| 3500/50               |          |          |                       |           |                       |                   |                   |                   |
| $M_{vz1}$             | $t_{2k}$ | $t_{1m}$ | $Q_{MCH}$             | $Q_{MCH}$ | $M_{chvz}$            | $S_{\epsilon 15}$ | $S_{\epsilon 20}$ | $S_{\epsilon 30}$ |
| [kg.h <sup>-1</sup> ] | [°C]     | [°C]     | [kJ.h <sup>-1</sup> ] | [kW]      | [kg.h <sup>-1</sup> ] | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    |
| 475,8                 | 140,87   | 20,00    | 58083,14              | 16,13     | 5750,81               | 0,91              | 0,68              | 0,46              |
| 465,7                 | 139,64   | 30,00    | 51574,15              | 14,33     | 5106,35               | 0,81              | 0,61              | 0,40              |
| 454,9                 | 139,19   | 40,00    | 45575,55              | 12,66     | 4512,43               | 0,72              | 0,54              | 0,36              |
| 445,0                 | 138,63   | 50,00    | 39835,07              | 11,07     | 3944,07               | 0,63              | 0,47              | 0,31              |
| 435,4                 | 138,24   | 60,00    | 34405,70              | 9,56      | 3406,5                | 0,54              | 0,40              | 0,27              |
| 426,0                 | 137,53   | 70,00    | 29058,73              | 8,07      | 2877,1                | 0,46              | 0,34              | 0,23              |
| 415,7                 | 136,17   | 80,00    | 23582,62              | 6,55      | 2334,91               | 0,37              | 0,28              | 0,19              |

Tab. 5.10 Výsledky z výpočtů mezichladiče, nejvyšší zatížení motoru

| 1750/100              |          |          |                       |           |                       |                   |                   |                   |
|-----------------------|----------|----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $M_{vz1}$             | $t_{2k}$ | $t_{1m}$ | $Q_{MCH}$             | $Q_{MCH}$ | $M_{chvz}$            | $S_{\epsilon 15}$ | $S_{\epsilon 20}$ | $S_{\epsilon 30}$ |
| [kg.h <sup>-1</sup> ] | [°C]     | [°C]     | [kJ.h <sup>-1</sup> ] | [kW]      | [kg.h <sup>-1</sup> ] | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    |
| 238,5                 | 160,66   | 20,00    | 33885,07              | 9,41      | 3354,96               | 0,53              | 0,40              | 0,27              |
| 233,8                 | 160,42   | 30,00    | 30799,91              | 8,56      | 3049,5                | 0,48              | 0,36              | 0,24              |
| 229,0                 | 161,80   | 40,00    | 28176,80              | 7,83      | 2789,78               | 0,44              | 0,33              | 0,22              |
| 225,3                 | 162,77   | 50,00    | 25660,29              | 7,13      | 2540,62               | 0,40              | 0,30              | 0,20              |
| 221,4                 | 163,88   | 60,00    | 23234,18              | 6,45      | 2300,41               | 0,36              | 0,27              | 0,18              |
| 213,3                 | 164,74   | 70,00    | 20412,65              | 5,67      | 2021,05               | 0,32              | 0,24              | 0,16              |
| 213,6                 | 166,21   | 80,00    | 18602,70              | 5,17      | 1841,85               | 0,29              | 0,22              | 0,15              |

| 2500/100              |          |          |                       |           |                       |                   |                   |                   |
|-----------------------|----------|----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $M_{vz1}$             | $t_{2k}$ | $t_{1m}$ | $Q_{MCH}$             | $Q_{MCH}$ | $M_{chvz}$            | $S_{\epsilon 15}$ | $S_{\epsilon 20}$ | $S_{\epsilon 30}$ |
| [kg.h <sup>-1</sup> ] | [°C]     | [°C]     | [kJ.h <sup>-1</sup> ] | [kW]      | [kg.h <sup>-1</sup> ] | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    |
| 370,6                 | 157,34   | 20,00    | 51413,95              | 14,28     | 5090,49               | 0,81              | 0,61              | 0,40              |
| 362,3                 | 157,99   | 30,00    | 46834,31              | 13,01     | 4637,06               | 0,74              | 0,55              | 0,37              |
| 356,6                 | 158,73   | 40,00    | 42762,99              | 11,88     | 4233,96               | 0,67              | 0,50              | 0,34              |
| 348,3                 | 159,80   | 50,00    | 38632,50              | 10,73     | 3825                  | 0,61              | 0,45              | 0,30              |
| 339,0                 | 159,58   | 60,00    | 34096,57              | 9,47      | 3375,9                | 0,54              | 0,40              | 0,27              |
| 332,9                 | 160,94   | 70,00    | 30579,91              | 8,49      | 3027,71               | 0,48              | 0,36              | 0,24              |
| 326,9                 | 161,70   | 80,00    | 26972,99              | 7,49      | 2670,59               | 0,42              | 0,32              | 0,21              |
| 3500/100              |          |          |                       |           |                       |                   |                   |                   |
| $M_{vz1}$             | $t_{2k}$ | $t_{1m}$ | $Q_{MCH}$             | $Q_{MCH}$ | $M_{chvz}$            | $S_{\epsilon 15}$ | $S_{\epsilon 20}$ | $S_{\epsilon 30}$ |
| [kg.h <sup>-1</sup> ] | [°C]     | [°C]     | [kJ.h <sup>-1</sup> ] | [kW]      | [kg.h <sup>-1</sup> ] | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    | m <sup>2</sup>    |
| 530,4                 | 164,26   | 20,00    | 77274,56              | 21,47     | 7650,95               | 1,21              | 0,91              | 0,61              |
| 519,7                 | 164,11   | 30,00    | 70398,52              | 19,56     | 6970,15               | 1,10              | 0,83              | 0,55              |
| 508,5                 | 162,19   | 40,00    | 62751,12              | 17,43     | 6212,98               | 0,98              | 0,74              | 0,49              |
| 496,3                 | 161,62   | 50,00    | 55944,92              | 15,54     | 5539,1                | 0,88              | 0,66              | 0,44              |
| 483,7                 | 159,69   | 60,00    | 48700,99              | 13,53     | 4821,88               | 0,76              | 0,57              | 0,38              |
| 473,0                 | 160,39   | 70,00    | 43183,54              | 12,00     | 4275,6                | 0,68              | 0,51              | 0,34              |
| 444,4                 | 150,32   | 80,00    | 31562,85              | 8,77      | 3125,03               | 0,50              | 0,37              | 0,25              |

$M_{vz1}$  – množství plnicího vzduchu protékající přes mezichladič do motoru

$t_{1m}$  – teplota na výstupu z mezichladiče (požadovaná)

$t_{2k}$  – teplota na vstupu do mezichladiče

$Q_{MCH}$  – výkon mezichladiče, resp. teplo, které musí být odvedené

$M_{chvz}$  - množství chladícího (okolního) vzduchu, které musí protékat mezichladičem

$S_{\epsilon}$  – čelní plocha mezichladiče při rychlosti protékajícího vzduchu 15, 20, 30 m.s<sup>-1</sup>

Pokud srovnáme efektivní výkon motoru, který získáme díky ochlazení plnicího vzduchu a výkon mezichladiče pak např. při režimu 3500/100 získám nejvíce 8,35 kW, ale za cenu potřebného výkonu mezichladiče 21,47 kW. To znamená poměr 1:2,6 v neprospěch efektivního výkonu motoru a účinnost blížící se k 40%. Dále vidíme, že účinnost chlazení se zvyšuje lineárně s rychlostí proudění vzduchu a naopak. Z čehož vyplývá, že pro větší rychlosti nám stačí mnohem menší rozměry mezichladiče.

Při skutečném výpočtu mezichladiče se volí kompromis dle použití vozidla. U závodních vozidel je na prvním místě výkon motoru. Tomu odpovídají velké činné plochy používaných mezichladičů, které zajišťují potřebný chladicí výkon i v nízkých rychlostech, tak aby byl výkon dostupný již při akceleraci a ne jenom ve vysokých rychlostech, kdy už je intenzivnější průtok vzduchu mezichladičem. U sériových vozidel je potřeba brát v úvahu možné rozměry pro zástavbu (u moderních vozidel není v motorovém prostoru a

před ním místa nazbyt, např. z důvodu deformačních zón), zohlednit provoz v zimních a letních měsících. Příliš ochlazený plnicí vzduch má za následek zvýšení spotřeby paliva a tím i celkového objemu emisí. Proto jsou některé motory v poslední době vybavovány vzduchovou směšovací klapkou, která umožňuje podle potřeby i úplné přemostění mezichladiče. Naopak příliš teplý vzduch proudící do motoru může, pokud pominu znatelnou ztrátu výkonu, při dlouhodobém působení způsobit degradaci dílů sacího systému, které jsou dnes z důvodu hmotnosti často plastové. Řešením pro udržení rovnoměrnějšího chladícího výkonu za různých okolních podmínek je používání mezichladičů typu vzduch – voda, které se i přes vyšší náklady začíná v poslední době mnohem více prosazovat než v minulosti.

## 6 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval problematikou působení teploty plnicího vzduchu na vybrané parametry vznětového přeplňovaného motoru.

V teoretické části jsem se zaměřil na vysvětlení činnosti vznětového turbodmychadlem přeplňovaného motoru některých pojmů a výpočetních vztahů, se kterými jsem dále v textu pracoval. Je zde také uvedena část teoretických výpočtů s odkazem na kompletní výsledky v přílohách. Další výpočty poté navázaly na konkrétní měření, které mělo potvrdit nebo vyvrátit teoretické výpočty. Pro vlastní měření jsem nejprve zvolil jednotlivé měřicí režimy, tak aby byly co nejprůkaznější a poté sestavil metodiku měření. Naměřené hodnoty jsem z důvodu objektivnosti měření podle zvolené metodiky vyhodnotil na nejistoty měření. Následně jsem aritmetické průměry z tohoto vyhodnocení použil pro srovnání s hodnotami získanými z výpočtů a také pro sestrojení grafů demonstrující vliv vybraných parametrů na teplotu plnicího vzduchu.

Z teoretických výpočtů vychází, že tepelná účinnost motoru se s růstem teploty plnicího vzduchu (rozdíl pro výpočty a následné měření byl zvolen na 60 °C) asi o jedno procento zvýší. Je to dáno tím, že se změnou teploty se mění i adiabatický exponent a také se mění entalpie vzduchu. Dále jsem výpočty ověřil vliv teploty plnicího vzduchu na efektivní výkon motoru, který se následně prokázal při měření a na plnicí resp. objemovou (dopravní) účinnost.

Z měření je patrné, že vliv na výkon není až tak velký, jak napovídají teoretické výpočty. Nepřesnost výpočtů je daná tím, že některé vstupní parametry, se kterými je počítáno jako s konstantami, se ve skutečnosti při chodu motoru jen vlivem rozdílné teploty plnicího vzduchu mění. Největší rozdíly výkonu motoru jsou logicky v režimu nejvyšších zvolených otáček a zatížení motoru ( $3500 \text{ min}^{-1}/100 \%$ ). Dle výpočtů se výkon mění od cca 111 kW do cca 140 kW což znamená rozdíl značných 29 kW. Měřením se potvrdilo, že rozdíl není až tak výrazný, ale i tak činí nezanedbatelných cca 8,4 kW. Opakem nejvyššího zvoleného režimu byl režim s polovičním zatížením a otáčkami motoru  $1750 \text{ min}^{-1}$ , kde se také teoretické výpočty nejvíce blížily skutečnosti. Rozdíl mezi teorií a měřením zde činil jen cca 6 kW. Souvisí to ale hlavně s maximálním výkonem motoru dosahovaným v tomto režimu. V případě procentuelního vyhodnocení vychází

nejmenší rozdíl mezi výpočtem a měření v režimu maximálního zatížení motoru a otáček motoru  $1750 \text{ min}^{-1}$  a sice jen 43 %. Jinde je rozdíl až 89 %.

S výkonem motoru samozřejmě souvisí točivý moment motoru. Ten jsem jen měřil. Jelikož výkon motoru se vypočítá na základě točivého momentu a otáček motoru, nebylo nutné dopočítávat teoretický točivý moment. Procentuelní rozdíly by tudíž byly naprosto totožné jako u výkonu. Nejmenší rozdíl naměřeného točivého momentu činil cca 5,5 N.m a největší asi 35 N.m.

Jelikož měření probíhalo na sériovém motoru bez jakýchkoliv, úprav a bez možnosti do zásahu řídicí jednotky, nejsou naměřené hodnoty dány jen vlivem rozdílné teploty plnicího vzduchu, ale spíše demonstrují jak s touto skutečností řídicí jednotka pracuje, jak se rozdílným teplotám přizpůsobuje, jak jich využívá nebo jak se snaží tento vliv omezit. Pokud bychom chtěli zkoumat čistě jen vliv teploty plnicího vzduchu na parametry motoru, museli bychom mít k dispozici otevřený řídicí systém motoru. Pak by bylo možné nastavit (omezit), aby řídicí jednotka neprováděla korekce vlivem rozdílné teploty plnicího vzduchu (např. zrušit omezení dávky paliva vlivem kouřivosti či vysoké teploty výfukových plynů apod.). Nicméně by to nebylo možné odstranit úplně.

Naměřené rozdíly výkonu a točivého momentu se mohou zdát vzhledem k absolutním hodnotám marginální. Z vlastní zkušenosti z dlouhodobého provozu vozidla vybaveného obdobným vznětovým turbodmychadlem přepínaným motorem mohu potvrdit, že výkon motoru a spotřeba paliva se vlivem okolní teploty mění.

V práci jsem také ověřil, že i z teoretických výpočtů lze dosáhnout hodnot, které se příliš neliší od skutečnosti. Jen je potřeba dosazovat za vstupní proměnné co nejpřesnější hodnoty, které musíme předem naměřit. Pokud bych měl například pro výpočet výkonu přesné hodnoty vzdušného součinitele pro všechny režimy, byly by výsledky přesnější a rozdíly mezi výpočty a měřením menší.

Na práci by se dalo navázat podobným tématem a sice vyhodnotit vliv vlhkosti vzduchu na vybrané parametry, protože zejména hodnoty emisí se s různou vlhkostí mění.



## 7 Seznam použité literatury

- [1] Turbocharger [online] cit. [15-12-2010] dostupné z WWW:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Turbocharger>
- [2] Vzduch [online] cit. [23-3-2011] dostupné z WWW:  
<http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm#fyzikalni-vlastnosti-vzduchu>
- [3] BARTONÍČEK, Ladislav. *Přepřehování pístových spalovacích motorů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. 76 s. ISBN 80-7083-800-0
- [4] MACEK, Jan. SUK, Bohuslav. *Spalovací motory I*. PRAHA: Vydavatelství ČVUT, 1993. 224s. ISBN 80-01-00919-X
- [5] PULKRABEK, Willard. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey: University of Wisconsin, 1997. 411 s. ISBN 0135708540
- [6] ISTENÍK, Rastislav. *Spaľovacie motory, riešené príklady*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2005. 190 s. ISBN 80-8070-371-X
- [7] Turbo přidá motoru sílu. [online] cit. [8-5-2011] dostupné z WWW:  
[http://auto.idnes.cz/turbo-prida-motoru-silu-dosahuje-az-300-000-otacek-za-minutu-pei-/automoto.aspx?c=A101222\\_172626\\_automoto\\_fdv](http://auto.idnes.cz/turbo-prida-motoru-silu-dosahuje-az-300-000-otacek-za-minutu-pei-/automoto.aspx?c=A101222_172626_automoto_fdv)
- [8] JIČÍNSKÝ, Štěpán. *Osciloskop a jeho využití v autoopravářské praxi*. PRAHA: Grada Publishing, a.s., 2006. 240 s. ISBN 80-247-1417-5
- [9] Instrumentation and Test Systems [online] cit. [12-3-2011] dostupné z WWW:  
<https://www.avl.com/testing-equipment>
- [10] Dynamometr na vířivé proudy a jeho regulace [online] cit. [12-5-2011] dostupné z WWW: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25051](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25051)
- [11] KADLEC, Z. *Termomechanika návody do cvičení*. OSTRAVA: VŠB-TUO, 2002. 97 s. ISBN 978-80-248-1736-1
- [12] How Turbochargers Work [online] cit. [17-2-2011] dostupné z WWW:  
<http://auto.howstuffworks.com/turbo2.htm>
- [13] KOLEK, Rostislav. *Ověření dynamických a statických charakteristik automobilů. Diplomová práce*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, 2010. 101 s.
- [14] Úvod do praktické fyziky I, zpracování výsledků měření [online] cit. [12-5-2011] dostupné z WWW: [physics.mff.cuni.cz/kfnt/cs/vyuka/upf/kap1.ppt](http://physics.mff.cuni.cz/kfnt/cs/vyuka/upf/kap1.ppt)
- [15] Nejistoty měření [online] cit. [12-5-2011] dostupné z WWW:  
[352lab.vsb.cz:83/SberDat/navod.pdf](http://352lab.vsb.cz:83/SberDat/navod.pdf)
- [16] ELSAWIN Application [počítačový program]. Volkswagen AG. Verze 3.61. 2002.
- [17] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. BRNO: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2003. 580 s. ISBN 80-238-8756-4

## **8 Seznam příloh**

PŘÍLOHA A: Naměřené výsledky a vyhodnocení nejistot měření

PŘÍLOHA B: Naměřené výsledky diagnostickým programem VCDS

PŘÍLOHA C: Souhrnné výsledky a grafy

PŘÍLOHA D: Porovnání hodnot vypočtených a naměřených vybraných parametrů

## **PŘÍLOHA A: Naměřené výsledky a vyhodnocení nejistot měření**

Příloha je kvůli svému rozsahu umístěna jen na vloženém CD. Jedná se o soubor naměřených výsledků ovládacím programem provozní místnosti doplněný o statistické vyhodnocení nejistot měření. V souboru vytvořeném programem Microsoft Excel 2003 jsou při statistickém zpracování standardních chyb měření použity vztahy z kapitoly 5, kde je naznačen postup vyhodnocení dat. Při zpracování souboru do formátu A4 by zabíral nejméně 24 stran a navíc by byl nepřehledný.

**PŘÍLOHA B: Naměřené výsledky diagnostickým programem VCDS**

Soubor obsahuje dat z diagnostického programu VCDS. Jedná se diagnostický a komunikační program zejména vozidel Volkswagen group. Jednou z jeho funkcí je možnost nahrávání dat vybraných měřících kanálů. Z mnou zvolených jsem v práci využíval zejména množství nasávaného vzduchu. Dále je mimo jiné z dat patrné, že teplota paliva na vstupu do vysokotlakého čerpadla udržovala předvolených 30 °C.

Nahrávané veličiny programem VCDS:

|            |   |                          |
|------------|---|--------------------------|
| $n_{mV}$   | otáčky klikového hřídele motoru                         | $[\text{min}^{-1}]$      |
| $t_{1mV}$  | teplota nasávaného vzduchu do motoru za škrticí klapkou | $[\text{°C}]$            |
| $m_{1vV}$  | hmotnost nasávaného vzduchu do motoru                   | $[\text{min}^{-1}]$      |
| $M_{pV}$   | spotřeba paliva   | $[\text{mg.zdvih}^{-1}]$ |
| $p_{prV}$  | tlak paliva v zásobníku (v railu)                       | $[\text{bar}]$           |
| $t_{oV}$   | teplota okolí   | $[\text{°C}]$            |
| $p_{atmV}$ | tlak okolí  | $[\text{bar}]$           |
| $t_{pvV}$  | teplota paliva na vstupu do vysokotlakého čerpadla      | $[\text{°C}]$            |
| $p_{1mV}$  | plnicí tlak nasávaného vzduchu do motoru                | $[\text{bar}]$           |

Jednotky jsem pro autentičnost ponechal původní.

Zpracované výsledky z  $n_{mV}$  1750  $\text{min}^{-1}$  a polovičního zatížení motoru.

| $n_{mV}$<br>[ $\text{min}^{-1}$ ] | $t_{1vV}$<br>[ $\text{°C}$ ] | $m_{1vV}$<br>[ $\text{mg/zdvih}$ ] | $M_{pV}$<br>[ $\text{l/h}$ ] | $p_{prV}$<br>[ $\text{bar abs}$ ] | $t_{oV}$<br>[ $\text{°C}$ ] | $p_{atmV}$<br>[ $\text{mbar}$ ] | $t_{pvV}$<br>[ $\text{°C}$ ] | $p_{1vV}$<br>[ $\text{mbar abs}$ ] |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1754                              | 20                           | 1032                               | 12,6                         | 1069,4                            | 25                          | 982                             | 28,7                         | 2150                               |
| 1743                              | 20                           | 1039,3                             | 12,6                         | 1069,4                            | 25                          | 982                             | 28,7                         | 2150                               |
| 1747,5                            | 20                           | 1031,1                             | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,7                         | 2150                               |
| 1742,5                            | 20                           | 1041,6                             | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,7                         | 2150                               |
| 1739,5                            | 20                           | 1035,9                             | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,7                         | 2150                               |
| 1756,5                            | 30                           | 1013,6                             | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1758,5                            | 30                           | 1000                               | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1748,5                            | 30                           | 1006,5                             | 12,6                         | 1071,9                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1743,5                            | 30                           | 1016,7                             | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1756                              | 30                           | 1003,6                             | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1754,5                            | 40                           | 988,9                              | 12,6                         | 1071,9                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1745                              | 40                           | 986,4                              | 12,6                         | 1076,8                            | 25                          | 982                             | 28,7                         | 2150                               |
| 1746,5                            | 40                           | 999,2                              | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1758                              | 40                           | 989,7                              | 12,6                         | 1076,8                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1746,5                            | 40                           | 988,3                              | 12,6                         | 1079,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1757,5                            | 50                           | 974                                | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1744,5                            | 50                           | 964,7                              | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1751                              | 50                           | 965,2                              | 12,6                         | 1076,8                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |
| 1757,5                            | 50                           | 976,5                              | 12,6                         | 1074,3                            | 25                          | 982                             | 28,8                         | 2150                               |

Posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky vznětového motoru

|        |    |       |      |        |    |     |      |      |
|--------|----|-------|------|--------|----|-----|------|------|
| 1747   | 50 | 964,6 | 12,6 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,8 | 2150 |
| 1750,5 | 60 | 952,4 | 12,6 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1755,5 | 60 | 932,7 | 12,6 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1739,5 | 60 | 940,8 | 12,6 | 1076,8 | 25 | 981 | 28,9 | 2150 |
| 1741,5 | 60 | 945,7 | 12,6 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1751   | 60 | 946,9 | 12,7 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1745   | 70 | 940,6 | 12,6 | 1071,9 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1743   | 70 | 932   | 12,6 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1751,5 | 70 | 925,5 | 12,6 | 1079,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1752,5 | 70 | 922,6 | 12,6 | 1071,9 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1755,5 | 70 | 928,1 | 12,6 | 1071,9 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1751   | 79 | 927,8 | 12,6 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1743,5 | 79 | 913,4 | 12,6 | 1074,3 | 25 | 981 | 28,9 | 2150 |
| 1751   | 79 | 927,6 | 12,6 | 1079,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |
| 1749   | 79 | 911,9 | 12,6 | 1079,3 | 25 | 981 | 28,9 | 2150 |
| 1743   | 79 | 916,7 | 12,6 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2150 |

Zpracované výsledky z  $n_{mV} 2500 \text{ min}^{-1}$  a polovičního zatížení motoru.

| $n_{mV}$<br>[min <sup>-1</sup> ] | $t_{1VV}$<br>[°C] | $m_{1VV}$<br>[mg/zdvih] | $M_{pV}$<br>[l/h] | $p_{pV}$<br>[bar abs] | $t_{oV}$<br>[°C] | $p_{atmV}$<br>[mbar] | $t_{pVV}$<br>[°C] | $p_{1VV}$<br>[mbar abs] |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 2505,5                           | 20                | 1163,9                  | 16,3              | 1452,8                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2494,5                           | 20                | 1173,7                  | 16,4              | 1447,9                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2503,5                           | 20                | 1167,3                  | 16,3              | 1455,3                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2502,5                           | 20                | 1174,4                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2502,5                           | 20                | 1160,4                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,4              | 2330                    |
| 2502                             | 30                | 1144,6                  | 16,3              | 1443,0                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2502                             | 30                | 1153,9                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2497                             | 30                | 1129,2                  | 16,3              | 1447,9                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2504                             | 30                | 1153,4                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2499,5                           | 30                | 1134,1                  | 16,3              | 1447,9                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2503,5                           | 40                | 1121                    | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2494,5                           | 40                | 1115,5                  | 16,3              | 1447,9                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2496                             | 40                | 1107,9                  | 16,6              | 1452,8                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2500,5                           | 40                | 1111,5                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2505                             | 40                | 1119,6                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2499                             | 50                | 1090                    | 16,3              | 1445,5                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2506                             | 50                | 1096,1                  | 16,3              | 1445,5                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2500,5                           | 50                | 1092,3                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,6              | 2330                    |
| 2494,5                           | 50                | 1093,6                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2507                             | 50                | 1095,3                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,6              | 2340                    |
| 2495                             | 60                | 1061,8                  | 16,3              | 1447,9                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2503                             | 60                | 1069,2                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2503                             | 60                | 1066,3                  | 16,3              | 1452,8                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2505,5                           | 60                | 1063,5                  | 16,3              | 1447,9                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2496                             | 60                | 1065,9                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2493,5                           | 70                | 1053                    | 16,4              | 1447,9                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2500                             | 70                | 1046,8                  | 16,3              | 1445,5                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2504,5                           | 70                | 1055,7                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2494                             | 70                | 1046,4                  | 16,4              | 1447,9                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2500,5                           | 70                | 1051,3                  | 16,3              | 1445,5                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |
| 2497                             | 79                | 1034,5                  | 16,3              | 1450,4                | 25               | 982                  | 28,7              | 2330                    |

Posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky vznětového motoru

|        |    |        |      |        |    |     |      |      |
|--------|----|--------|------|--------|----|-----|------|------|
| 2496   | 79 | 1035,5 | 16,3 | 1450,4 | 25 | 982 | 28,7 | 2330 |
| 2505   | 79 | 1026,3 | 16,3 | 1452,8 | 25 | 982 | 28,7 | 2330 |
| 2499,5 | 79 | 1030,5 | 16,3 | 1447,9 | 25 | 982 | 28,7 | 2330 |
| 2496,5 | 79 | 1034   | 16,3 | 1450,4 | 25 | 982 | 28,7 | 2320 |

Zpracované výsledky z  $n_{mV}$  3500 min<sup>-1</sup> a polovičního zatížení motoru.

| $n_{mV}$<br>[min <sup>-1</sup> ] | $t_{1vV}$<br>[°C] | $m_{1vV}$<br>[mg/zdvih] | $M_{pV}$<br>[l/h] | $p_{prV}$<br>[bar abs] | $t_{oV}$<br>[°C] | $p_{atmV}$<br>[mbar] | $t_{pvV}$<br>[°C] | $p_{1vV}$<br>[mbar abs] |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 3504                             | 20                | 1138,3                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3497                             | 20                | 1130,5                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3502                             | 20                | 1131,6                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3503,5                           | 20                | 1132,2                  | 21,1              | 1640,9                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3496                             | 20                | 1131,5                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3499,5                           | 30                | 1109                    | 21,1              | 1640,9                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3497,5                           | 30                | 1113,6                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3497                             | 30                | 1101,6                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3503,5                           | 30                | 1110,2                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3501,5                           | 30                | 1110,1                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3502                             | 40                | 1073,3                  | 21,1              | 1631,2                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3501                             | 40                | 1082,2                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3503                             | 40                | 1087,3                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3497,5                           | 40                | 1089,4                  | 21,1              | 1640,9                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3501                             | 40                | 1083,5                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3501,5                           | 50                | 1060,9                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3501,5                           | 50                | 1066,4                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3496                             | 50                | 1058,5                  | 21,1              | 1633,6                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3500                             | 50                | 1056,8                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3499,5                           | 50                | 1055,3                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3502                             | 60                | 1033,5                  | 21,1              | 1640,9                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3503,5                           | 60                | 1031,2                  | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3496                             | 60                | 1048,5                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3499,5                           | 60                | 1037,7                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3504                             | 60                | 1032,6                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3504,5                           | 70                | 1009,8                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3496                             | 70                | 1008,9                  | 21,1              | 1640,9                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3499,5                           | 70                | 1018,5                  | 21,1              | 1633,6                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2240                    |
| 3496                             | 70                | 1013,3                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3504                             | 70                | 1021,2                  | 21,1              | 1636,0                 | 25               | 982                  | 29                | 2240                    |
| 3505                             | 80                | 991,4                   | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 29                | 2230                    |
| 3499,5                           | 80                | 990,2                   | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 29                | 2230                    |
| 3501,5                           | 80                | 985                     | 21,1              | 1643,4                 | 25               | 982                  | 29                | 2230                    |
| 3503,5                           | 80                | 994,9                   | 21,1              | 1638,5                 | 25               | 982                  | 29                | 2230                    |
| 3498,5                           | 80                | 986,8                   | 21,1              | 1640,9                 | 25               | 982                  | 29                | 2230                    |

Zpracované výsledky z  $n_{mV}$  1750 min<sup>-1</sup> a nejvyššího zatížení motoru.

| $n_{mV}$<br>[min <sup>-1</sup> ] | $t_{1vV}$<br>[°C] | $m_{1mV}$<br>[mg/zdvih] | $M_{pV}$<br>[l/h] | $p_{prV}$<br>[bar abs] | $t_{oV}$<br>[°C] | $p_{atmV}$<br>[mbar] | $t_{pvV}$<br>[°C] | $p_{1mV}$<br>[mbar abs] |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| 1751                             | 20                | 1132,1                  | 16,8              | 1076,8                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2390                    |
| 1755                             | 20                | 1144,9                  | 16,9              | 1074,3                 | 25               | 982                  | 28,9              | 2390                    |

Posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky vznětového motoru

|        |    |        |      |        |    |     |      |      |
|--------|----|--------|------|--------|----|-----|------|------|
| 1754,5 | 20 | 1124,8 | 16,9 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1748   | 20 | 1135,9 | 16,9 | 1076,8 | 25 | 982 | 29   | 2390 |
| 1746   | 20 | 1141,4 | 16,8 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1750,5 | 30 | 1110,2 | 16,9 | 1071,9 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1755,5 | 30 | 1107,2 | 16,9 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1753,5 | 30 | 1115,1 | 16,9 | 1069,4 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1748,5 | 30 | 1118,2 | 16,8 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1744   | 30 | 1116,3 | 16,8 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1753   | 40 | 1091,2 | 16,8 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1754,5 | 40 | 1088,7 | 16,9 | 1071,9 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1757,5 | 40 | 1089,2 | 16,9 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1744   | 40 | 1090,5 | 16,8 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1751   | 40 | 1093,7 | 16,8 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1753,5 | 50 | 1055,2 | 16,7 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1754,5 | 50 | 1082,7 | 16,7 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1753,5 | 50 | 1078,6 | 16,6 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1759,5 | 50 | 1078,4 | 16,7 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1756   | 50 | 1069,3 | 16,7 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1751   | 60 | 1057,8 | 16,3 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1744,5 | 60 | 1054,7 | 16,3 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1748   | 60 | 1047,5 | 16,3 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1751   | 60 | 1057,8 | 16,3 | 1076,8 | 25 | 982 | 29   | 2390 |
| 1757,5 | 60 | 1054,8 | 16,4 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2400 |
| 1756,5 | 70 | 1040,1 | 16,1 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1745,5 | 70 | 1037   | 16,1 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1751   | 70 | 1031,9 | 16,1 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2400 |
| 1752,5 | 70 | 1005,8 | 16,2 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1754,5 | 70 | 1024,7 | 16,1 | 1076,8 | 25 | 982 | 28,9 | 2390 |
| 1750   | 80 | 1013,5 | 15,9 | 1076,8 | 25 | 982 | 29   | 2390 |
| 1750,5 | 80 | 1020,7 | 16   | 1074,3 | 25 | 982 | 29   | 2390 |
| 1750,5 | 80 | 1014,5 | 16   | 1074,3 | 25 | 982 | 29   | 2390 |
| 1751   | 80 | 1021,8 | 15,9 | 1074,3 | 25 | 982 | 29   | 2390 |
| 1747,5 | 80 | 1016,1 | 15,9 | 1074,3 | 25 | 982 | 28,9 | 2400 |

Zpracované výsledky z  $n_{mV}$  2500 min<sup>-1</sup> a nejvyššího zatížení motoru.

| $n_{mV}$<br>[min <sup>-1</sup> ] | $t_{1vV}$<br>[°C] | $m_{1vV}$<br>[mg/zdvih] | $M_{pV}$<br>[l/h] | $p_{pV}$<br>[hPa] | $t_{oV}$<br>[°C] | $p_{atmV}$<br>[mbar] | $t_{pvV}$<br>[°C] | $p_{1vV}$<br>[kPa rel] |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|-------------------|------------------------|
| 2505                             | 20                | 1239,4                  | 23,6              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2490                   |
| 2497,5                           | 20                | 1230,5                  | 23,7              | 1452,8            | 25               | 982                  | 29                | 2500                   |
| 2498                             | 20                | 1240,6                  | 23,6              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2490                   |
| 2505                             | 20                | 1244,4                  | 23,7              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2490                   |
| 2504,5                           | 20                | 1222,4                  | 23,6              | 1447,9            | 25               | 982                  | 29                | 2500                   |
| 2503,5                           | 30                | 1217,7                  | 23,6              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2500                   |
| 2505,5                           | 30                | 1205,8                  | 23,6              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2500                   |
| 2493                             | 30                | 1194,6                  | 23,6              | 1447,9            | 25               | 982                  | 29                | 2500                   |
| 2503,5                           | 30                | 1216,3                  | 23,6              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2500                   |
| 2494,5                           | 30                | 1204,1                  | 23,7              | 1452,8            | 25               | 982                  | 29                | 2500                   |
| 2504,5                           | 40                | 1197,2                  | 23,6              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2490                   |
| 2507                             | 40                | 1171,2                  | 23,7              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2490                   |
| 2498,5                           | 40                | 1187,7                  | 23,6              | 1450,4            | 25               | 982                  | 29                | 2490                   |
| 2498                             | 40                | 1181,2                  | 23,6              | 1447,9            | 25               | 982                  | 29                | 2490                   |

Posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky vznětového motoru

|        |    |        |      |        |    |     |      |      |
|--------|----|--------|------|--------|----|-----|------|------|
| 2498   | 40 | 1206,1 | 23,7 | 1447,9 | 25 | 982 | 29   | 2500 |
| 2505,5 | 50 | 1162,5 | 23,6 | 1452,8 | 25 | 982 | 29   | 2500 |
| 2507   | 50 | 1157,3 | 23,7 | 1450,4 | 25 | 982 | 29,2 | 2490 |
| 2504,5 | 50 | 1153,5 | 23,6 | 1450,4 | 25 | 982 | 29   | 2500 |
| 2493   | 50 | 1171,7 | 23,7 | 1447,9 | 25 | 982 | 29   | 2490 |
| 2497   | 50 | 1160,8 | 23,6 | 1450,4 | 25 | 982 | 29   | 2500 |
| 2506   | 60 | 1135   | 23,6 | 1450,4 | 25 | 982 | 29,2 | 2490 |
| 2494,5 | 60 | 1127,1 | 23,6 | 1447,9 | 25 | 982 | 29   | 2490 |
| 2494,5 | 60 | 1129,7 | 23,7 | 1450,4 | 25 | 982 | 29   | 2490 |
| 2500   | 60 | 1133,2 | 23,7 | 1450,4 | 25 | 982 | 29   | 2500 |
| 2496   | 60 | 1125   | 23,6 | 1450,4 | 25 | 982 | 29   | 2500 |
| 2501   | 70 | 1107,6 | 23,6 | 1452,8 | 25 | 982 | 29,2 | 2500 |
| 2502,5 | 70 | 1105,8 | 23,6 | 1450,4 | 25 | 982 | 29,2 | 2500 |
| 2502,5 | 70 | 1111,2 | 23,7 | 1447,9 | 25 | 982 | 29,2 | 2500 |
| 2502   | 70 | 1106,4 | 23,6 | 1450,4 | 25 | 982 | 29,2 | 2500 |
| 2506,5 | 70 | 1117,8 | 23,6 | 1447,9 | 25 | 982 | 29,2 | 2490 |
| 2504,5 | 80 | 1106,6 | 23,5 | 1450,4 | 25 | 982 | 29,2 | 2490 |
| 2494,5 | 80 | 1084,1 | 23,7 | 1447,9 | 25 | 982 | 29,2 | 2500 |
| 2501   | 80 | 1083,7 | 23,6 | 1450,4 | 25 | 982 | 29,2 | 2500 |
| 2503,5 | 80 | 1087,7 | 23,7 | 1450,4 | 25 | 982 | 29,2 | 2500 |
| 2497,5 | 80 | 1086   | 23,7 | 1447,9 | 25 | 982 | 29,2 | 2500 |

Zpracované výsledky z  $n_{mV}$  1750 min<sup>-1</sup> a nejvyššího zatížení motoru.

| $n_{mV}$<br>[min <sup>-1</sup> ] | $t_{1vV}$<br>[°C] | $m_{1vV}$<br>[mg/zdvih] | $M_{pV}$<br>[l/h] | $p_{pV}$<br>[hPa] | $t_{oV}$<br>[°C] | $p_{atmV}$<br>[mbar] | $t_{pV}$<br>[°C] | $p_{1vV}$<br>[kPa rel] |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|------------------|------------------------|
| 3508                             | 20                | 1262                    | 31,4              | 1750,8            | 25               | 982                  | 29,3             | 2550                   |
| 3504                             | 20                | 1262,8                  | 31,4              | 1745,9            | 25               | 982                  | 29,3             | 2540                   |
| 3499                             | 20                | 1263,8                  | 31,4              | 1748,3            | 25               | 982                  | 29,3             | 2550                   |
| 3503,5                           | 20                | 1257,2                  | 31,5              | 1743,4            | 25               | 982                  | 29,3             | 2550                   |
| 3497                             | 20                | 1267,9                  | 31,5              | 1745,9            | 25               | 982                  | 29,3             | 2550                   |
| 3506                             | 30                | 1238,8                  | 31,4              | 1748,3            | 25               | 982                  | 29,2             | 2550                   |
| 3498                             | 30                | 1238,6                  | 31,5              | 1748,3            | 25               | 982                  | 29,2             | 2550                   |
| 3499,5                           | 30                | 1233,7                  | 31,4              | 1750,8            | 25               | 982                  | 29,2             | 2540                   |
| 3499,5                           | 30                | 1240                    | 31,5              | 1750,8            | 25               | 982                  | 29,2             | 2550                   |
| 3498,5                           | 31                | 1236,3                  | 31,4              | 1748,3            | 25               | 982                  | 29,2             | 2550                   |
| 3500                             | 40                | 1206,7                  | 31,5              | 1743,4            | 25               | 982                  | 29,2             | 2540                   |
| 3498,5                           | 40                | 1214,8                  | 31,5              | 1750,8            | 25               | 982                  | 29,2             | 2550                   |
| 3501,5                           | 40                | 1210,7                  | 31,5              | 1748,3            | 25               | 982                  | 29,2             | 2540                   |
| 3497                             | 40                | 1211,5                  | 31,5              | 1745,9            | 25               | 982                  | 29,2             | 2540                   |
| 3501,5                           | 40                | 1209,7                  | 31,5              | 1748,3            | 25               | 982                  | 29,2             | 2550                   |
| 3497,5                           | 50                | 1188,1                  | 31,4              | 1755,7            | 25               | 982                  | 29,3             | 2540                   |
| 3500,5                           | 50                | 1186,6                  | 31,4              | 1755,7            | 25               | 982                  | 29,3             | 2550                   |
| 3497,5                           | 50                | 1179,3                  | 31,5              | 1753,2            | 25               | 982                  | 29,2             | 2540                   |
| 3497,5                           | 50                | 1170,7                  | 31,5              | 1753,2            | 25               | 982                  | 29,2             | 2550                   |
| 3498,5                           | 50                | 1183,1                  | 31,4              | 1748,3            | 25               | 982                  | 29,2             | 2550                   |
| 3499,5                           | 60                | 1144,1                  | 31,5              | 1745,9            | 25               | 982                  | 29,4             | 2550                   |
| 3498,5                           | 60                | 1154,6                  | 31,5              | 1750,8            | 25               | 982                  | 29,3             | 2550                   |
| 3499,5                           | 60                | 1148,3                  | 31,5              | 1748,3            | 25               | 982                  | 29,4             | 2540                   |
| 3497                             | 60                | 1154,9                  | 31,5              | 1750,8            | 25               | 982                  | 29,3             | 2540                   |
| 3505                             | 60                | 1156,4                  | 31,5              | 1755,7            | 25               | 982                  | 29,3             | 2540                   |
| 3497                             | 70                | 1121,5                  | 31,4              | 1753,2            | 25               | 982                  | 29,3             | 2540                   |



Posouzení vlivu parametrů nasávaného vzduchu na charakteristiky vznětového motoru

|        |    |        |      |        |    |     |      |      |
|--------|----|--------|------|--------|----|-----|------|------|
| 3497   | 70 | 1122,4 | 31,5 | 1753,2 | 25 | 982 | 29,3 | 2540 |
| 3505,5 | 70 | 1132,6 | 31,5 | 1745,9 | 25 | 982 | 29,3 | 2540 |
| 3497   | 70 | 1134,5 | 31,4 | 1745,9 | 25 | 982 | 29,2 | 2540 |
| 3499   | 70 | 1120,4 | 31,5 | 1743,4 | 25 | 982 | 29,3 | 2540 |
| 3504   | 79 | 1055,3 | 30,7 | 1750,8 | 25 | 982 | 29   | 2430 |
| 3498   | 79 | 1064,7 | 30,7 | 1753,2 | 25 | 982 | 29   | 2430 |
| 3501   | 79 | 1055,1 | 30,6 | 1748,3 | 25 | 982 | 29   | 2430 |
| 3499,5 | 79 | 1055,3 | 30,6 | 1745,9 | 25 | 982 | 29   | 2430 |
| 3498,5 | 79 | 1060,4 | 30,6 | 1753,2 | 25 | 982 | 29   | 2430 |

### **PŘÍLOHA C: Souhrnné výsledky a grafy**

Příloha je pro svůj rozsah umístěna jen na přiloženém CD. Obsahuje souhrn dat ze statického vyhodnocení. Pro použitelnost dat k tvorbě grafů data představují jen aritmetický průměr ze statistického vyhodnocení bez odchylek.

## PŘÍLOHA D: Porovnání hodnot vypočtených a naměřených vybraných parametrů

V příloze je srovnání vypočítaných a naměřených parametrů některých hodnot. Rozdíly jsou vyjádřeny jak v absolutních hodnotách tak v procentech. Výpočty byly získány na základě vztahů uvedených v hlavní části práce. Příloha navazuje na kapitolu 5.4 a tab. 5.7.

Legenda k tabulkám:

$M_p$  - naměřená hodinová spotřeba paliva [ $\text{kg.h}^{-1}$ ]

$M_{p\text{teor}}$  - teoretická hodinová spotřeba paliva [ $\text{kg.h}^{-1}$ ]

$m_{vz\text{VCDS}}$  – průtok vzduchu sacím systémem motoru naměřený programem VCDS [ $\text{kg.h}^{-1}$ ]

$m_{vz\text{teor}}$  – teoretický průtok vzduchu sacím systémem motoru [ $\text{kg.h}^{-1}$ ]

$P_e$  - naměřený efektivní výkon motoru [kW]

$P_{e\text{teor}}$  - teoretický efektivní výkon motoru [kW]

$p_{1mA}$  - naměřený absolutní tlak plnicího vzduchu za mezichladičem [Pa]

$Q_p$  - výkon přivedený palivem [kW]

$T_{1m}$  - teplota plnicího vzduchu za mezichladičem [K]

$t_{1m}$  - teplota plnicího vzduchu za mezichladičem [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\rho_{1m}$  - hustota plnicího vzduchu za mezichladičem [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

Srovnání vybraných naměřených a vypočtených hodnot při režimu 1750/50

| $t_{1m}$               | $T_{1m}$     | $p_{1mA}$              | $\rho_{1m}$            | $m_{vz\text{teor}}$    | $m_{vz\text{VCDS}}$    | $M_{p\text{teor}}$     | $M_p$                  | $Q_p$    | $P_{e\text{teor}}$ | $P_e$ |
|------------------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|--------------------|-------|
| [ $^{\circ}\text{C}$ ] | [K]          | [Pa]                   | [ $\text{kg.m}^{-3}$ ] | [ $\text{kg.h}^{-1}$ ] | [ $\text{kg.h}^{-1}$ ] | [ $\text{kg.h}^{-1}$ ] | [ $\text{kg.h}^{-1}$ ] | [kW]     | [kW]               | [kW]  |
| 20,00                  | 293,15       | 214650                 | 2,551                  | 237,2                  | 217,6                  | 9,92                   | 10,22                  | 117,1    | 46,83              | 49,55 |
| 30,00                  | 303,15       | 214788                 | 2,469                  | 229,6                  | 211,7                  | 9,60                   | 10,23                  | 113,3    | 45,31              | 49,29 |
| 40,00                  | 313,15       | 214776                 | 2,390                  | 222,2                  | 208,0                  | 9,29                   | 10,26                  | 109,7    | 43,86              | 49,03 |
| 50,00                  | 323,15       | 215028                 | 2,319                  | 215,6                  | 203,5                  | 9,01                   | 10,24                  | 106,4    | 42,55              | 48,72 |
| 60,00                  | 333,15       | 214962                 | 2,248                  | 209,1                  | 198,2                  | 8,74                   | 10,24                  | 103,2    | 41,26              | 48,15 |
| 70,00                  | 343,15       | 214976                 | 2,183                  | 203,0                  | 195,2                  | 8,48                   | 10,23                  | 100,2    | 40,06              | 47,93 |
| 80,00                  | 353,15       | 214968                 | 2,121                  | 197,2                  | 193,1                  | 8,24                   | 10,23                  | 97,3     | 38,93              | 47,49 |
|                        |              |                        |                        |                        |                        |                        |                        | $\Delta$ | 7,90               | 2,06  |
| $\Delta P_e$           | $\Delta P_e$ | $\Delta m_{vz}$        | $\Delta m_{vz}$        | $\Delta M_p$           | $\Delta M_p$           |                        |                        |          |                    |       |
| [kW]                   | [%]          | [ $\text{kg.h}^{-1}$ ] | [%]                    | [ $\text{kg.h}^{-1}$ ] | [%]                    |                        |                        |          |                    |       |
| 2,72                   | 5,49         | 19,7                   | 8,30                   | 0,30                   | 2,95                   |                        |                        |          |                    |       |
| 3,98                   | 8,08         | 17,9                   | 7,78                   | 0,63                   | 6,19                   |                        |                        |          |                    |       |
| 5,17                   | 10,54        | 14,2                   | 6,40                   | 0,97                   | 9,47                   |                        |                        |          |                    |       |
| 6,17                   | 12,66        | 12,1                   | 5,61                   | 1,23                   | 12,02                  |                        |                        |          |                    |       |
| 6,88                   | 14,30        | 10,9                   | 5,20                   | 1,50                   | 14,68                  |                        |                        |          |                    |       |
| 7,87                   | 16,41        | 7,7                    | 3,81                   | 1,74                   | 17,05                  |                        |                        |          |                    |       |
| 8,56                   | 18,02        | 4,1                    | 2,10                   | 1,99                   | 19,42                  |                        |                        |          |                    |       |

Srovnání vybraných naměřených a vypočtených hodnot při režimu 2500/50

| $t_{1m}$     | $T_{1m}$     | $p_{1mA}$             | $\rho_{1m}$           | $m_{vz,teor}$         | $m_{vz,VCDS}$         | $M_{p,teor}$          | $M_p$                 | $Q_p$    | $P_{e,teor}$ | $P_e$ |
|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|--------------|-------|
| [°C]         | [K]          | [Pa]                  | [kg.m <sup>-3</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]     | [kW]         | [kW]  |
| 20,00        | 293,15       | 232214                | 2,760                 | 366,6                 | 350,4                 | 15,32                 | 13,34                 | 180,9    | 72,37        | 66,10 |
| 30,00        | 303,15       | 232236                | 2,669                 | 354,6                 | 342,9                 | 14,82                 | 13,35                 | 175,0    | 69,99        | 65,78 |
| 40,00        | 313,15       | 232376                | 2,586                 | 343,5                 | 334,5                 | 14,36                 | 13,42                 | 169,5    | 67,79        | 65,50 |
| 50,00        | 323,15       | 232266                | 2,504                 | 332,7                 | 328,0                 | 13,91                 | 13,35                 | 164,2    | 65,66        | 65,04 |
| 60,00        | 333,15       | 232326                | 2,430                 | 322,8                 | 319,6                 | 13,49                 | 13,40                 | 159,3    | 63,71        | 64,73 |
| 70,00        | 343,15       | 232416                | 2,360                 | 313,5                 | 315,2                 | 13,10                 | 13,39                 | 154,7    | 61,88        | 64,44 |
| 80,00        | 353,15       | 232456                | 2,294                 | 304,7                 | 309,6                 | 12,73                 | 13,39                 | 150,3    | 60,13        | 64,12 |
|              |              |                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\Delta$ | 12,23        | 1,98  |
| $\Delta P_e$ | $\Delta P_e$ | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta M_p$          | $\Delta M_p$          |                       |                       |          |              |       |
| [kW]         | [%]          | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   |                       |                       |          |              |       |
| -6,27        | -8,66        | 16,3                  | 4,44                  | -1,98                 | -14,84                |                       |                       |          |              |       |
| -4,21        | -6,01        | 11,7                  | 3,29                  | -1,47                 | -11,00                |                       |                       |          |              |       |
| -2,29        | -3,38        | 8,9                   | 2,60                  | -0,94                 | -6,97                 |                       |                       |          |              |       |
| -0,63        | -0,96        | 4,6                   | 1,40                  | -0,55                 | -4,13                 |                       |                       |          |              |       |
| 1,02         | 1,58         | 3,2                   | 0,98                  | -0,09                 | -0,67                 |                       |                       |          |              |       |
| 2,57         | 3,99         | -1,7                  | -0,54                 | 0,28                  | 2,13                  |                       |                       |          |              |       |
| 3,99         | 6,22         | -5,0                  | -1,63                 | 0,65                  | 4,88                  |                       |                       |          |              |       |

Srovnání vybraných naměřených a vypočtených hodnot při režimu 3500/50

| $t_{1m}$     | $T_{1m}$     | $p_{1mA}$             | $\rho_{1m}$           | $m_{vz,teor}$         | $m_{vz,VCDS}$         | $M_{p,teor}$          | $M_p$                 | $Q_p$    | $P_{e,teor}$ | $P_e$ |
|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|--------------|-------|
| [°C]         | [K]          | [Pa]                  | [kg.m <sup>-3</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]     | [kW]         | [kW]  |
| 20,00        | 293,15       | 223220                | 2,653                 | 493,4                 | 475,8                 | 20,62                 | 16,92                 | 243,5    | 97,39        | 80,97 |
| 30,00        | 303,15       | 223300                | 2,567                 | 477,3                 | 465,7                 | 19,95                 | 16,96                 | 235,5    | 94,21        | 80,60 |
| 40,00        | 313,15       | 223374                | 2,485                 | 462,2                 | 454,9                 | 19,32                 | 16,95                 | 228,1    | 91,23        | 80,37 |
| 50,00        | 323,15       | 223460                | 2,409                 | 448,1                 | 445,0                 | 18,73                 | 16,99                 | 221,1    | 88,44        | 80,17 |
| 60,00        | 333,15       | 223554                | 2,338                 | 434,8                 | 435,4                 | 18,17                 | 16,98                 | 214,6    | 85,82        | 79,83 |
| 70,00        | 343,15       | 223564                | 2,270                 | 422,2                 | 426,0                 | 17,65                 | 16,98                 | 208,3    | 83,33        | 79,38 |
| 80,00        | 353,15       | 222250                | 2,193                 | 407,8                 | 415,7                 | 17,05                 | 16,96                 | 201,2    | 80,49        | 78,98 |
|              |              |                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\Delta$ | 16,90        | 1,99  |
| $\Delta P_e$ | $\Delta P_e$ | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta M_p$          | $\Delta M_p$          |                       |                       |          |              |       |
| [kW]         | [%]          | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   |                       |                       |          |              |       |
| -16,42       | -16,86       | 17,6                  | 3,57                  | -3,70                 | -21,87                |                       |                       |          |              |       |
| -13,61       | -14,45       | 11,6                  | 2,43                  | -2,99                 | -17,65                |                       |                       |          |              |       |
| -10,86       | -11,91       | 7,3                   | 1,58                  | -2,37                 | -13,95                |                       |                       |          |              |       |
| -8,28        | -9,36        | 3,1                   | 0,69                  | -1,74                 | -10,21                |                       |                       |          |              |       |
| -6,00        | -6,99        | -0,6                  | -0,13                 | -1,19                 | -7,04                 |                       |                       |          |              |       |
| -3,95        | -4,74        | -3,8                  | -0,91                 | -0,66                 | -3,90                 |                       |                       |          |              |       |
| -1,51        | -1,92        | -7,8                  | -1,92                 | -0,09                 | -0,53                 |                       |                       |          |              |       |

Srovnání vybraných naměřených a vypočtených hodnot při režimu 1750/100

| $t_{1m}$     | $T_{1m}$     | $p_{1mA}$             | $\rho_{1m}$           | $m_{vz,teor}$         | $m_{vz,VCDS}$         | $M_{p,teor}$          | $M_p$                 | $Q_p$    | $P_{e,teor}$ | $P_e$ |
|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|--------------|-------|
| [°C]         | [K]          | [Pa]                  | [kg.m <sup>-3</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]     | [kW]         | [kW]  |
| 20,00        | 293,15       | 239148                | 2,842                 | 264,3                 | 238,5                 | 14,02                 | 13,78                 | 165,5    | 66,22        | 66,81 |
| 30,00        | 303,15       | 239168                | 2,749                 | 255,6                 | 233,8                 | 13,56                 | 13,79                 | 160,1    | 64,04        | 66,30 |
| 40,00        | 313,15       | 239210                | 2,662                 | 247,5                 | 229,0                 | 13,13                 | 13,80                 | 155,0    | 62,00        | 65,79 |
| 50,00        | 323,15       | 239198                | 2,579                 | 239,8                 | 225,3                 | 12,72                 | 13,66                 | 150,2    | 60,08        | 64,66 |
| 60,00        | 333,15       | 239180                | 2,502                 | 232,6                 | 221,4                 | 12,34                 | 13,41                 | 145,7    | 58,27        | 62,84 |
| 70,00        | 343,15       | 239332                | 2,430                 | 226,0                 | 213,3                 | 11,99                 | 13,23                 | 141,5    | 56,61        | 61,66 |
| 80,00        | 353,15       | 239418                | 2,362                 | 219,7                 | 213,6                 | 11,65                 | 13,11                 | 137,6    | 55,03        | 60,39 |
|              |              |                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\Delta$ | 11,19        | 6,43  |
| $\Delta P_e$ | $\Delta P_e$ | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta M_p$          | $\Delta M_p$          |                       |                       |          |              |       |
| [kW]         | [%]          | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   |                       |                       |          |              |       |
| 0,60         | 0,89         | 25,8                  | 9,76                  | -0,24                 | -1,77                 |                       |                       |          |              |       |
| 2,26         | 3,41         | 21,8                  | 8,53                  | 0,23                  | 1,66                  |                       |                       |          |              |       |
| 3,79         | 5,76         | 18,5                  | 7,46                  | 0,67                  | 4,88                  |                       |                       |          |              |       |
| 4,58         | 7,09         | 14,5                  | 6,06                  | 0,94                  | 6,86                  |                       |                       |          |              |       |
| 4,57         | 7,27         | 11,2                  | 4,80                  | 1,07                  | 7,95                  |                       |                       |          |              |       |
| 5,05         | 8,19         | 12,6                  | 5,60                  | 1,24                  | 9,39                  |                       |                       |          |              |       |
| 5,36         | 8,88         | 6,0                   | 2,74                  | 1,46                  | 11,13                 |                       |                       |          |              |       |

Srovnání vybraných naměřených a vypočtených hodnot při režimu 2500/100

| $t_{1m}$     | $T_{1m}$     | $p_{1mA}$             | $\rho_{1m}$           | $m_{vz,teor}$         | $m_{vz,VCDS}$         | $M_{p,teor}$          | $M_p$                 | $Q_p$    | $P_{e,teor}$ | $P_e$ |
|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|--------------|-------|
| [°C]         | [K]          | [Pa]                  | [kg.m <sup>-3</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]     | [kW]         | [kW]  |
| 20,00        | 293,15       | 248904                | 2,958                 | 393,0                 | 370,6                 | 20,85                 | 19,39                 | 246,1    | 98,45        | 97,50 |
| 30,00        | 303,15       | 249030                | 2,862                 | 380,2                 | 362,3                 | 20,17                 | 19,42                 | 238,1    | 95,25        | 96,92 |
| 40,00        | 313,15       | 249032                | 2,771                 | 368,1                 | 356,6                 | 19,53                 | 19,45                 | 230,5    | 92,21        | 96,19 |
| 50,00        | 323,15       | 249086                | 2,686                 | 356,8                 | 348,3                 | 18,93                 | 19,47                 | 223,4    | 89,38        | 95,40 |
| 60,00        | 333,15       | 249130                | 2,606                 | 346,1                 | 339,0                 | 18,36                 | 19,43                 | 216,8    | 86,71        | 94,45 |
| 70,00        | 343,15       | 249166                | 2,530                 | 336,1                 | 332,9                 | 17,83                 | 19,48                 | 210,5    | 84,20        | 93,56 |
| 80,00        | 353,15       | 249172                | 2,458                 | 326,6                 | 326,9                 | 17,33                 | 19,51                 | 204,5    | 81,81        | 92,81 |
|              |              |                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\Delta$ | 16,64        | 4,69  |
| $\Delta P_e$ | $\Delta P_e$ | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta M_p$          | $\Delta M_p$          |                       |                       |          |              |       |
| [kW]         | [%]          | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   |                       |                       |          |              |       |
| -0,95        | -0,98        | 22,4                  | 5,69                  | -1,46                 | -7,54                 |                       |                       |          |              |       |
| 1,67         | 1,72         | 17,9                  | 4,71                  | -0,75                 | -3,85                 |                       |                       |          |              |       |
| 3,98         | 4,14         | 11,5                  | 3,12                  | -0,08                 | -0,41                 |                       |                       |          |              |       |
| 6,03         | 6,32         | 8,4                   | 2,36                  | 0,54                  | 2,79                  |                       |                       |          |              |       |
| 7,74         | 8,20         | 7,1                   | 2,06                  | 1,07                  | 5,52                  |                       |                       |          |              |       |
| 9,37         | 10,01        | 3,2                   | 0,94                  | 1,65                  | 8,49                  |                       |                       |          |              |       |
| 11,00        | 11,85        | -0,3                  | -0,09                 | 2,18                  | 11,18                 |                       |                       |          |              |       |

Srovnání vybraných naměřených a vypočtených hodnot při režimu 3500/100

| $t_{1m}$     | $T_{1m}$     | $p_{1mA}$             | $\rho_{1m}$           | $m_{vz,teor}$         | $m_{vz,VCDS}$         | $M_{p,teor}$          | $M_p$                 | $Q_p$    | $P_{e,teor}$ | $P_e$  |
|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|--------------|--------|
| [°C]         | [K]          | [Pa]                  | [kg.m <sup>-3</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [kW]     | [kW]         | [kW]   |
| 20,00        | 293,15       | 253284                | 3,010                 | 559,9                 | 530,4                 | 29,70                 | 25,85                 | 350,6    | 140,26       | 122,98 |
| 30,00        | 303,15       | 253404                | 2,913                 | 541,7                 | 519,7                 | 28,74                 | 25,96                 | 339,2    | 135,70       | 122,48 |
| 40,00        | 313,15       | 253446                | 2,820                 | 524,5                 | 508,5                 | 27,82                 | 25,83                 | 328,5    | 131,38       | 121,74 |
| 50,00        | 323,15       | 253560                | 2,734                 | 508,5                 | 496,3                 | 26,97                 | 25,93                 | 318,4    | 127,38       | 121,25 |
| 60,00        | 333,15       | 253618                | 2,653                 | 493,3                 | 483,7                 | 26,17                 | 25,97                 | 309,0    | 123,58       | 120,37 |
| 70,00        | 343,15       | 252644                | 2,565                 | 477,1                 | 473,0                 | 25,31                 | 25,92                 | 298,8    | 119,52       | 119,46 |
| 80,00        | 353,15       | 242112                | 2,389                 | 444,3                 | 444,4                 | 23,57                 | 25,24                 | 278,2    | 111,29       | 114,63 |
|              |              |                       |                       |                       |                       |                       |                       | $\Delta$ | 28,97        | 8,35   |
| $\Delta P_e$ | $\Delta P_e$ | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta m_{vz}$       | $\Delta M_p$          | $\Delta M_p$          |                       |                       |          |              |        |
| [kW]         | [%]          | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   | [kg.h <sup>-1</sup> ] | [%]                   |                       |                       |          |              |        |
| -17,28       | -12,32       | 29,5                  | 5,27                  | -3,86                 | -14,92                |                       |                       |          |              |        |
| -13,21       | -9,74        | 21,9                  | 4,05                  | -2,77                 | -10,67                |                       |                       |          |              |        |
| -9,64        | -7,34        | 16,0                  | 3,04                  | -1,99                 | -7,70                 |                       |                       |          |              |        |
| -6,12        | -5,05        | 12,2                  | 2,40                  | -1,04                 | -4,02                 |                       |                       |          |              |        |
| -3,21        | -2,67        | 9,6                   | 1,95                  | -0,20                 | -0,77                 |                       |                       |          |              |        |
| -0,06        | -0,05        | 4,1                   | 0,85                  | 0,61                  | 2,34                  |                       |                       |          |              |        |
| 3,34         | 2,91         | -0,2                  | -0,04                 | 1,67                  | 6,62                  |                       |                       |          |              |        |